



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

조경학 석사학위논문

지상 LiDAR 측량을 통한 입목재적량
부위별 추정에 관한 연구

- 느티나무 및 벚나무 가로수 개별목을 대상으로 -

2019년 8월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부 생태조경학 전공

린 지 아 이

지상 LiDAR 측량을 통한 입목재적량 부위별 추정에 관한 연구

- 느티나무 및 벚나무 가로수 개별목을 대상으로 -

지도교수 이 동 근

이 논문을 생태조경학 석사학위논문으로 제출함
2019년 4월

서울대학교 대학원
생태조경학과
린 지 아 이

린지아이의 생태조경학 석사학위논문을 인준함
2019년 7월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

근대화 이후 인류의 활동은 급속한 과학기술의 발전과 경제성장으로 지구생태계에 직접적으로 영향을 끼쳐왔다. 생태계 파괴와 관련된 환경 문제, 특히 지구온난화 문제가 가속화 됨에 따라 많은 연구자들이 도시의 주변환경, 도시 녹지, 도시공원 및 육상 녹화와 같은 대상에 주목하는 추세이다. 그 가운데 도로 생태환경의 중요한 부분인 가로수는 도시의 녹화 활동의 중심지이자, 도시의 탄소 저장지로 꼽힌다.

수목은 탄소 순환에 중요한 역할을 한다. 수목의 체적, 바이오매스, 탄소 저장량은 탄소 고정에서부터 광합성을 통한 산소 방출 등 탄소순환기능을 평가하는 중요한 매개변수로 활용된다. 기후변화와 지구온난화의 우려와 함께 도시에서 에너지사용과 이산화탄소 발생을 저감시키고 탄소 흡수원을 증진시키기 위한 노력이 중요한 정책으로 받아들여지면서 도시 수목과 녹지의 기후변화 대응 관련 기능이 더욱 강조되고 있다.

이를 위해서는 수목의 체적 및 바이오매스를 산정할 필요성이 있다. 기존의 측정방법은 수목의 매개변수를 측정하여 상대생장식, 입목체적식을 통해 산정하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 노동집약적이고 시간이 오래 걸리며 파괴적이라는 점이 한계로 지적되고 있다.

최근에는 지상 LiDAR (Light Detection and Ranging) 센서가 3차원 수목 구조를 정확하고 효율적으로 정량화하는 도구로 폭넓게 활용된다. 목표가 되는 물체를 지상 LiDAR 센서를 활용해 점군데이터(Point cloud) 형태의 정확한 3차원 기술은 객관적인 물체를 복원하고, 진실적으로 표면의 형태를 정확하게 반영할 수 있는 특성이 있으며 위치 정보를 출력할 수 있다. 이러한 특성을 반영하여 3D 모델링 및 수목의 표면 재구성 분야에서도 널리 사용되고 있다.

따라서 본 연구는 한국 서울에서 가로수로 주로 식재되는 느티나무와 벚나무를 연구대상으로 3월과 6월 서로 다른 시기에 지상 LiDAR 센서를 활용하여 데이터를 취득하고, 단목 부위별 체적 산정량을 비교하는 연구를 진행하였다. 수종별 산정방법으로 기존 산림측량분야에서 사용하

는 입목재적식, 상대생장식, 그리고 지상 LiDAR 데이터 기반 Voxel화 (Voxelize) 산정 방법 및 계층화 방법 등 다양한 산정 방법을 통하여 수목의 형태를 고려한 단목 부위별 체적을 산정하고 비교하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다.

기존 산림측량 분야에서 사용했던 입목재적식에 비하여 느티나무의 경우 수간부 복셀화 재적이 25.79% 증가하거나 마이너스 16.39%로 나타났다. 계층화로 추정하는데 17.36% 증가하거나 25.17% 낮았다. 벚나무의 수간부 복셀화 재적은 42.14% 증가하거나 마이너스 26.24%로 나타났다. 계층화로 추정하는데 22.96% 증가하거나 마이너스 26.24% 낮았다. 가지부 복셀화 재적결과를 봤을 때에 벚나무 66.40% 증가하거나 43.44% 낮았으며 느티나무는 24.98 증가하거나 20.89% 낮았다.

연구는 가로수 수종인 느티나무, 벚나무의 입목재적량을 LiDAR 데이터를 기반으로 다양한 산정식을 활용해 추정하였다. 연구결과 산정방법의 차이에 따라 수종별 입목재적량의 차이가 나타났으며, 수목의 구조와도 일정한 차이 및 관계가 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 지상 레이저 스캐너, 탄소흡수, 상대생장식, 입목재적, 3차원 데이터, 복셀화, 도시생태, 가로수, 측량, 계층화

학 번 : 2017-28913

목 차

제1장 서 론	1
제1절 연구의 배경 및 목적	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	3
제2장 이론 및 선행연구 고찰	4
제1절 이론적 배경	4
1. 지상 LiDAR	4
2. 입목재적	5
제2절 선행연구 고찰	6
1. LiDAR 측량을 통한 수목 재적 연구	6
2. 소결	8
제3장 연구범위 및 방법	9
제1절 연구흐름	9
제2절 연구범위	10
제3절 데이터 획득 및 전처리	11
1. 현장조사	11
2. 지상 LiDAR 측량	15
제4절 연구방법	17
1. 지상 LiDAR 데이터 전처리	17
1.1. 단일 수목 추출	17
1.2. 흉고직경 추출	18

1.3. 수고 추출	19
2. 수목의 부위별 재적 추정	20
2.1. 지상 LiDAR 측량에 의한 수간부 재적 추정	20
2.1.1. Smalian식에 의한 수간부 재적 추정	20
2.1.2. 계층화 방식에 의한 재적 추정	21
2.1.3. Voxel화 방식에 의한 재적 추정	22
2.2. 지상 LiDAR 측량에 의한 가지부 재적 추정	23
2.2.1. 상대생장식을 통한 가지부 재적 추정	23
2.2.2. Voxel화 방식에 의한 가지부 재적 추정	23
제4장 결과 및 고찰	24
제1절 부위별 재적량 산정 결과	24
1. 수간부 재적	24
2. 가지부 재적	36
2. 옆층부 체적	42
2. 수목 지상부 바이오매스	44
제2절 수목의 흉고직경 및 수고 산정결과	51
제5장 결론	56
참고문헌	59

표 목 차

<표 4-1> 느티나무 수간 채적 추정 결과	27
<표 4-2> 벚나무 수간 채적 추정 결과	28
<표 4-3> 느티나무 가지부 채적 산정 추정 결과	37
<표 4-4> 벚나무 가지부 채적 산정추정 결과	38
<표 4-5> 지상 LiDAR기반 산정 된 옆층부 채적	43
<표 4-6> 느티나무 바이오매스 산정결과	44
<표 4-7> 벚나무 바이오매스 산정결과	45
<표 4-8> 느티나무 수고 및 흉고직경 측량 결과	51
<표 4-9> 벚나무 수고 및 흉고직경 측량 결과	52

그 립 목 차

[그림 3-1] 연구 대상지 및 현장사진	10
[그림 3-2] 지상 LiDAR 대상물 스캔 원리	12
[그림 3-3] FARO s350 지상 LiDAR (이미지 레퍼런스)	13
[그림 3-3] FARO s350 지상 LiDAR (이미지 레퍼런스)	13
[그림 3-2] 지상 LiDAR 대상물 스캔 원리	13
[그림 3-4] 느티나무 스캔 현장	14
[그림 3-5] 벚나무 스캔 현장	15
[그림 3-7] 지상 LiDAR 스캔된 벚나무 점군데이터	16
[그림 3-6] 지상 LiDAR 스캔된 느티나무 점군데이터	16
[그림 3-8] 경사보정 처리과정	17
[그림 3-9] 개별목 점군데이터 추출결과	18
[그림 3-10] 흉고직경 추출 과정	19
[그림 3-11] 수간부 응용된 Smalia 식 (St: 원구단면적, Sb: 말구 단면적, h: 수간부 높이)	20
[그림 3-12] 개별목 수간부 처리과정	21
[그림 3-13] 복셀화 처리 과정	22
[그림 4-1] 벚나무 사이즈별 복셀화 추출결과	25
[그림 4-2] 느티나무 사이즈별 복셀화 추출결과	25
[그림 4-3] 사이즈별 복셀화 이미지 결과	26
[그림 4-4] 벚나무 수간부 재적량: 스말리안식과 복셀화 방식간의 추정 값 비교	29
[그림 4-5] 벚나무 수간부 재적량: 스말리안식과 계층화 방식간의 추정 값 비교	29
[그림 4-6] 느티나무 수간부 재적량: 스말리안식과 복셀화 방식간의 추정 값 비교	30

[그림 4-7] 느티나무 수간부 재적량: 스말리안식과 계층화	30
[그림 4-8] 벚나무 수간부 복셀화 상대적 비율 차이($(b-a)/a$)	31
[그림 4-9] 벚나무 수간부 계층화 상대적 비율 차이($(c-a)/a$)	31
[그림 4-10] 느티나무 수간부 복셀화 상대적 비율 차이($(b-a)/a$)	32
[그림 4-11] 느티나무 수간부 계층화 상대적 비율 차이($(c-a)/a$)	32
[그림 4-12] 스말리안식과 복셀화 4.5cm 방식에 따른 수간부 재적 상관 성 분석 결과 (벚나무 경우)	33
[그림 4-13] 스말리안식과 계층화 방식에 따른 수간부 재적 상관성 분석 결과 (벚나무 경우)	33
[그림 4-14] 스말리안식과 복셀화 4.5cm 방식에 따른 수간부 재적 상관 성 분석 결과 (느티나무 경우)	34
[그림 4-15] 스말리안식과 계층화 방식에 따른 수간부 재적 상관성 분석 결과(느티나무 경우)	34
[그림 4-16] 수종별 실제 점군데이터	35
[그림 4-17] 사이즈 별 가지부 복셀화 추출 결과	36
[그림 4-18] 벚나무 가지부 재적량: 상대생장식과 복셀화 방식간의 추정 값 비교결과	39
[그림 4-19] 느티나무 가지부 재적량: 상대생장식과 복셀화 방식간의 추 정값 비교결과	39
[그림 4-20] 스말리안식과 복셀화 방식에 따른 가지부 재적 상관성 분석 결과 (벚나무 경우)	40
[그림 4-21] 스말리안식과 복셀화 방식에 따른 가지부 재적 상관성 분석 결과 (느티나무 경우)	40
[그림 4-22] 수종별 실제 점군데이터	41
[그림 4-23] 벚나무 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적 비율차이 $[(b+e)-d]/d$	46
[그림 4-24] 벚나무 계층화 및 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적 비율차이 $[(c+e)-d]/d$	46
[그림 4-25] 느티나무 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적 비율차이	

$[(b+e)-d]/d$	47
[그림 4-27] 느티나무 계층화 및 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적 비율차이 $[(c+e)-d]/d$	47
[그림 4-27] 상대생장식과 복셀화 방식에 따른 바이오매스 상관성 분석 결과 (벗나무 경우)	48
[그림 4-28] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에 따른 상관성 분석결과 (벗나무 경우)	48
[그림 4-29] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에 따른 바이오매스 상관성분석 결과 (느티나무 경우)	49
[그림 4-30] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에 따른 바이오매스 상관성분석 결과 (느티나무 경우)	49
과(벗나무 경우)	53
[그림 4-32] 현장실측과 지상 LiDAR 측량에 따른 수고 상관성 분석 결과 (느티나무 경우)	53

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

인류의 급속한 경제 발전은 지구의 생태계를 파괴하고 기후변화, 열 효과, 생물 다양성의 손실 등 전세계적으로 생태 환경 문제들을 야기하였다.

생태학자들뿐만 아니라 기후학자들도 숲 환경에 대해서 많은 관심을 기울이고 있다. 지구온난화가 가속화됨에 따라 연구자들은 도시의 주변 환경, 도시공원 및 옥상녹화 등을 연구 대상으로 고려하게 되었다(김권수 외, 2011). 숲 뿐만 아니라 숲 밖에서의 도시농업을 도시경관의 일부로 보고 있으며, 주로 캐노피가 높지 않은 자연 식생들이 식재되어 있는 곳들이 대상지이다.

도시 내에서 수목 식재와 녹지의 확충은 이산화탄소 흡수 기능 외에도 도시 미관 개선, 미기후조절, 물 순화 기능 등 많은 환경적 기능을 수행하면서 그 요구들이 증대되고 있다(박은진 외, 2010). 특히 도로 생태환경의 중요한 부분인 가로수는 도시 녹화 활동의 중심요소이며 도시의 탄소 저장지로서 도시의 기후 개선, 공기 정화, 환경 미화, 도시의 탄소와 산소의 균형 유지, 온실화 완화 등의 기능을 한다(강규이 외, 2010). 경관을 구성하는 도심지에서 가로수와 도시 숲은 도시 미관을 아름답게 하여 심미적 안정감을 주고, 대기 오염물질과 이산화탄소를 흡수하며, 작은 동식물의 서식처로서 도시생태계에 중요한 기능을 한다.

수목의 체적, 바이오매스, 탄소 저장량은 수목이 탄소 고정으로부터 산소를 방출하는 능력을 측정하는데 중요한 매개변수이며 생태학적 이점을 평가하는 중요 지표 중의 하나이기도 하다(Pretzsch, H., et al. 2017).

가속화 되고 있는 기후변화와 지구온난화에 대한 우려는 도시에서의 에너지 및 이산화탄소 발생량을 줄이고, 탄소흡수원을 확충하는 것을 목표로 하는 정책 과제로 이어지고 있다.

실천적으로 도시 수목과 녹지의 기후 변화 대응과 관련된 기능이 더욱 강조되는 추세이다.

2. 연구의 목적

산림측량에서 수목의 탄소저장량, 재적량을 산정하기 위해 파괴 식으로 수목을 벌채하고 수목의 건 중량을 측정한다. 이는 비효율적이면서 기존 생태계를 파괴할 수 있다는 문제점을 가지고 있다(손영모 외, 2016). 도시 내부 수목을 벌채하여 파괴식 방법을 활용해 상대생장식을 개발하는 것은 비현실적이며, 도시 수목의 경우 매우 큰 가치를 지니고 있기에 일반적으로 위해가 되지 않는 한 벌채하지 않는다(Nowak 1993).

특히 천연산림에 비하여 자연생태 시스템을 위주로 설계하는 방법은 도시지역으로 옮길 수 없는 가능성이 있다.(McHale, Burke et al. 2009)

기존 방법을 이용한 수목의 매개변수 측정은 노동량이 큰데 비해 정확도가 떨어지는 단점이 있었다. 이런 이유로 산림측량 데이터 생산에 어려움이 있었으나, 지상 3차원 레이저 스캐닝 기술의 적용은 수목 측정의 효율 및 측정 정확도에 있어 큰 향상을 가져왔다. 지상 레이저 스캐닝 기술은 목표가 되는 대상 물체를 3차원 위치정보를 가지는 점군데이터(Point cloud) 형태로 출력해 주며, 정확도 또한 높기에 3D 모델링 및 수목의 표면 재구성 분야에서도 중요한 역할을 수행하고 있다(Tigges, J., et al. 2017).

따라서 본 연구의 목표는 기존 산림측량에서 사용하는 입목재적식, 상대생장식 등 입목재적 방법을 활용한 입목재적량과 지상 LiDAR를 활용한 입목재적 산정량을 비교하는데 있다. 세부적으로 수종별 수목의 형태에 따른 단목 부위별 체적 산정량을 비교하는 것을 목적으로 하였다.

제2장 이론 및 선행연구 고찰

제1절 이론적 배경

1. 지상 LiDAR

Lidar Detection and Ranging(LiDAR)은 능동형 원격탐사 센서이다. 원리는 라이다 센서를 통해 발사된 레이저 펄스가 대상물체에 맞고 반사되어 센서에 다시 탐지되기까지 걸린 시간을 계산함으로써 3차원 위치 정보를 출력하는 방식이다(Lefsky, Cohen et al. 2002). 근래에 산림분야에서는 LiDAR 센서를 수목의 흉고지경(DBH), 수관구조 등을 정량화하는데 사용하고 있다. 이는 기존 위성영상, 항공사진 등 기존 수동형 원격탐사 도구와는 달리 LiDAR 센서를 활용할 경우 수목의 위치정보와 형상을 3차원 데이터로 출력할 수 있기 때문에 가능한 것이다.

원격탐사 기술이 급속한 발전으로 전통적인 광학 원격 감지는 더 이상 공간정보 및 스펙트럼 정보에 대한 산림 자원 조사의 정확성 요구 사항을 만족할 수 없게 된다. 최근까지 LiDAR(Light Detection and Ranging)의 고정밀 3차원 공간 정보로 인해 임업 분야에서 널리 사용되었다. 예를 들면 엽 면적 밀도(Leaf area Density), 수고, 엽 면적 지수(Leaf area Index), 수간 직경 등이 있다.

지상 레이저 스캐닝 (Terrestrial Laser Scanning) 기술은 1990년대 중반에 급속히 발전한 새로운 기술로, 물체의 3D 기하학적 데이터를 정확하게 취득할 수 있다. 지상 기반 레이저 스캐닝 (TLS) 데이터는 다수의 "점군(Point Cloud)"으로 표현된다. 레이저 스캐닝 기술은 빠르고, 정확하게 점군 데이터를 취득할 수 있으며, 정보가 풍부하고 결과 이미지가 선명하다. 이러한 장점으로 건물 재구성, 지구 표면의 가상 현실화, 건축, 토목 공학, 고고학, 플랜트 설계, 자동화 시스템 및 임업과 같은 많은 분야에서 활용되고 있다. 임업 쪽에서 TLS는 개별 수목을 상세한

측정을 제공할 수 있으며 플롯 수준에서 수목의 위치, 높이, 흉고직경, 수목 체적등 여러 유용한 수목 매개 변수를 추정하는데 사용 할 수 있다 (Kankare, Holopainen et al. 2013).

2. 입목재적

우선 수목의 구조는 3차원 배열로 정의할 수 있다. 이러한 배열은 가지, 잎 및 꽃의 크기와 공간 배열을 포함하며 (Reinhardt and Kuhlemeier 2002) 특정 형태학적 특성에 의해 정의될 수 있다 (Rosati et al., 2013).

수목의 구조 특성은 수고, 바이오매스, 흉고직경, 성장 및 사망률 (Bentley et al., 2010; Kempes et al. 2011; West 1999b; West et al. 2009)과 같은 특정 연관성을 이해하고 탐색하는 데 사용될 수 있다. 따라서 수목 구조에 대한 정확한 설명은 수목의 성장단계 과정을 이해하는데 중요한 역할을 한다(Kempes et al., 2011; Rosati et al., 2013).

입목재적은 지상의 과수, 임목(일정한 장소에 집단으로 자라고 있는 수목의 집단) 수목의 3차원적인 부피로 정의된다. 보통 흉고직경, 수고 등을 통하여 산출된다.

입목의 재적은 일반적으로 입목의 흉고직경, 수고, 형수를 포함하는 함수에 의하여 추정된다. 하지만 형수의 변이가 입목재적에 미치는 영향은 흉고직경이나 수고의 변이가 재적에 미치는 영향보다 작고 또한 수종에 따라서 입목의 크기와 관계없이 형수는 상대적으로 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있기에 (Clutter J.R et al, 1983) 흉고직경과 수고의 변수만을 이용하여 재적을 산정하는 것이 일반적인 방법이었다.

제2절 선행연구 고찰

1. LiDAR 측량을 통한 수목 재적 연구

지난 20년간 임업 환경에서 LiDAR 데이터는 성공적으로 적용되어 왔다.

Michele Dalonte(2009)는 수목 수간 재적을 추정 및 분석하는데 다중 에코 LiDAR 데이터를 사용했다. Jinha Jung (2012)은 파형 LiDAR 데이터를 사용하여 산림 캐노피의 평균 높이를 추정했다. 또한 Reitberger(2008)는 LiDAR 에코 정보를 활용하여 수목종 분류를 진행했다. 가우스 분해를 사용하여 LiDAR 파형 데이터의 좌표정보, 강도 및 파형 폭 정보를 얻었으며 침엽수 및 활엽수림을 비감독 분류하였다.

한국 내에서는 기존 현장 조사랑 항공사진 측량으로 이루어졌던 산림 조사를 항공 라이다 데이터를 이용하여 수목의 표고분포, 면적 및 체적 산출, 수목 밀도 분포도를 3차원적으로 분석하여 산림지역에 대한 정보를 제작하는 연구를 진행해왔다. 특히, 항공 라이다 모의자료를 이용하여 가로수 정점을 추출하고 개별 가로수 영역을 분리하는 알고리즘이 제안 되었으며(조두영 외, 2012) GIS의 모델빌더(Model Build) 기능을 이용하여 수목을 추출하는 방법론도 제시되었다(이수지, 외 2013). 또한 산림영역에서 획득된 LiDAR 데이터의 지면점을 분류하고 산림지형을 보다 정밀하게 모델링(Modeling)하기 위해 세 가지 대표적인 필터링 방법을 적용하여 오차를 정량적으로 분석하였으며 필터링 기법이 아닌 같은 산림지역에 대하여 계절별로 획득된 항공 LiDAR 자료로부터 각각의 수고를 추정하였다. 황세란외 (2012)는 국내의 혼합림(mixed forest)에서 획득된 LiDAR 데이터를 이용하여 수고를 추정하고, 현장측정을 수행하여 추정 결과를 검증하였으며 지면 점을 분류하여 DTM를 생성하였고, 개별 수목 및 평균수고 추정연구를 하였다. 김의명(2013)은 LiDAR 자료와 RGB컬러(Color) 정사 영상자료를 이용하여 객체기반 영상분류법을 적용

하여 산림지역에서 개별 수목을 분류하고 수고 정보를 효율적으로 획득할 방법을 제안하였으며 또한 국내에서 수목의 공간정보를 효율적으로 추출하기 위하여 LiDAR 자료를 이용하는 방법론을 제안하였다. 장안진 (2008)은 원격탐사 자료 중 개체 목 구분 및 수고 추출이 가능한 LiDAR 데이터와 항공사진을 이용하여 산림지역의 바이오매스를 추정하고, 현장 실측 자료와 비교를 통해 정확도 평가를 수행하였으며 원격탐사 자료를 이용하여 수고, 흉고직경 등을 취득하고 바이오매스를 추정함으로써, 기존의 산림지역 측정 방법보다 경제적이고 효율적인 방법을 제시하는 연구를 진행해왔다.

또한 몇몇 연구는 TLS 데이터로부터 수목의 위치와 DBH를 자동으로 계산하는 방법을 제안했다(Simonse et al., 2003; Bienert et al., 2007; Lovell et al., 2011; Yao et al., 2011).

Simonse (2003)는 IMAGER 5003 장비와 GPS 장비를 사용하여 디지털 표고 모델과 샘플(Sample) 플롯의 위치를 추출했으며, 1.3m 높이의 횡단면의 점군 데이터를 추출하여 샘플 포인트 위치를 계산하여 결과를 GPS 결과와 비교하였다. DBH의 표준 편차는 2.8cm이고, 반경 위치 오차의 표준 오차는 3.6cm였다. Watt (2003)는 고속 레이저 스캐닝 시스템을 적용하여가문비나무숲의 수고와 흉고직경을 조사했다. Thies (2004)는 지상 레이저 스캐닝 기술로 개별 수목 구조 매개변수를 측정하는데 수고와 캐노피를 추출하기 위해 3차원 레이저 스캐너를 사용했다. Thies and Spiecker (2004)는 연속적으로 점군데이터를 세분화하여 개별 수목의 원통형 모델링을 수행하였으며, Raumonon (2013)은 수목 점군 데이터에 대해서 클러스터링(Clustering)하고 공간 구조에 따라 모든 수목을 불평등한 데이터 블록으로 나눴으며 각 열에는 약 7070개 실린더가 장착되어 수목을 모델링했는데 구조의 복원력 더 높게 나타났다. Holopainen et al (2011)은 TLS 데이터를 사용하여 20그루의 수목에 대하여 DBH를 계산하였으며, 이를 실측자료와 비교하는 상관분석을 진행했다. 예측된 수목 바이오매스와 측정된 수목 바이오매스의 상관 계수는 0.96에서 0.99 사이로 매우 높았다. 이는 TLS가 DBH 및 상위 수목

매개변수를 정확하게 추정할 수 있음을 시사한다.

일반적으로 주요 두 가지 방법을 적용하여 지상 LiDAR 스캔 데이터 중에서 수목 체적을 추출한다. 구조화된 포인트 클라우드를 큐브(Cube)로 변환하는 복셀화(Voxel) 프로세스(Lefsky and McHale, 2008; Hosoi et al., 2013)와 수목 수간 추정을 위한 원통형 피팅 알고리즘이 있다(Cote et al., 2009; Cote et al., 2011; Raunonen et al., 2013; Hackenberger et al., 2014; De Caldes et al., 2015).

2. 소결

선행연구를 살펴보면 항공 LiDAR를 적용한 수목 관련 연구는 숲, 수목의 흉고직경 및 수고 혹은 수종의 분류라는 범위적 한계가 있다. 지상 LiDAR 측량을 통한 수목의 체계적 연구는 공간적 범위로 보았을 때 산림위주로 진행되고 있지만 도시내부에 식재된 수목 혹은 수목의 종류에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

제3장 연구범위 및 방법

제1절 연구흐름

본 연구에서는 지상 LiDAR 데이터를 기반으로 단일 수목별로 식생 바이오매스를 정량화하고 추출하였으며, 이를 기존에 상대생장식, 수간 재적식에 적용하였다. 수목의 골격 모델을 추출하기 위해 낙엽기 및 개엽기의 데이터를 취득하였으며, 선행연구 검토를 통해 DBH 및 수고 등 기본 수목의 매개변수들을 추출하는 방법을 적용하였다.

문헌 연구를 통해, DBH 및 수고 기본 매개변수를 추출하기 위해 관련 이론을 적용하여 한국 국내에서 적용할 수 있는 입목재적식과 상대생장식을 기반으로 수목 재적 및 바이오매스를 추정하게 되었다.

관련 매개변수 추출없이 수목 재적량을 계산하기 위해 점군 데이터로부터 직접 모델링을 통해 재적을 계산하였다. LiDAR 데이터를 기반으로 한 결과와 실제 측정된 데이터를 통해 산출된 결과와 비교하여 느티나무와 벚나무의 부위별로 수간 가지, 옆 부위의 체적을 추정 및 비교하고자 한다.

제2절 연구범위

본 연구에서는 도시 행정구역 내의 산림을 제외한, 한국 서울시 서울대학교를 범위로 설정하여 연구를 진행하였다.

학내 많이 식재된 도시 조경수목인 느티나무 및 벚나무를 선정하여 2018년 3월의 봄 낙엽기와 2018년 6월의 여름 개엽기에 서울대학교 내 버들골 주변의 느티나무, 대학원 기숙사 주변 가로수 및 220동 종합연구동 앞에 식재되어 있는 벚나무를 연구대상으로 선정하였다.

봄, 여름 시기별로 28그루의 느티나무와 20그루의 벚나무 총 48그루의 수목을 선정하였다[그림 3-1].



[그림 3-1] 연구 대상지 및 현장사진

(왼쪽: 연구 대상지, 오른쪽: 실제 촬영 현장 사진, 빨간 라인부분:
선정된 수목 위치)

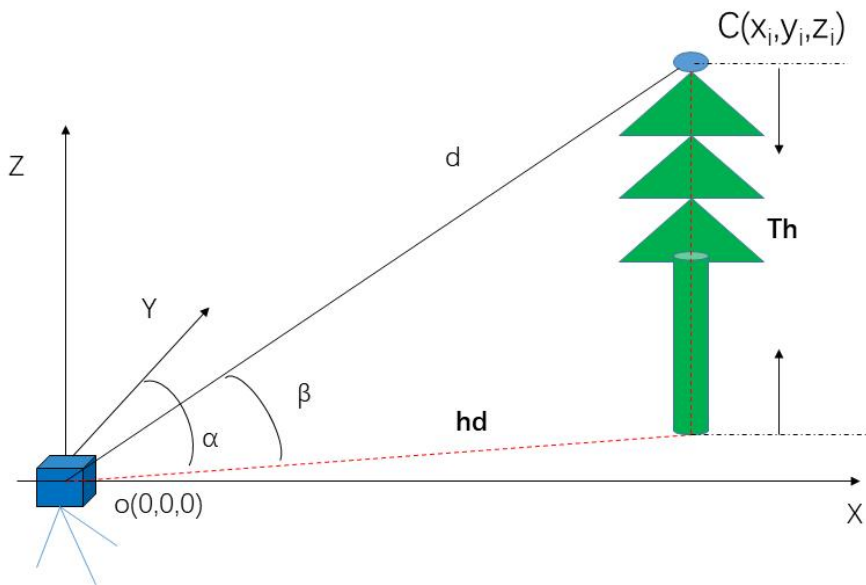
제3절 데이터 획득 및 전처리

1. 현장조사

2018년 3월과 2018년 6월에 수고측정기와 흉고직경자를 이용하여 대상 수목의 수고 및 흉고직경(1.3m 높이, 김중원, 2006)을 측정하여 기록하였다. 그리고 같은 3월과 6월에 지상 LiDAR로 수목을 스캔하여 데이터를 얻었다.

지상 LiDAR 장비는 크게 지지 부문, 장치 부문 및 소프트웨어 부문으로 구분되며 지지 부문은 측량용 삼각대와 장치부를 수평으로 설치할 수 있도록 하는 정전대로 구성된다(송철철, 2007). 장치부문에는 수평회전각과 수직회전각을 조절하고 기록하는 자동조절 장치, 레이저 발사 및 수신기, 그리고 디지털카메라가 장착되어 있다.

일반적으로 레이저 펄스 간의 해상도는 스캐닝 직전에 설정한다. 설정한 간격만큼 장치 부문의 자동조절 장치가 레이저 발사 및 수신기의 방향을 이동시켜 매우 짧은 순간에 레이저 펄스를 발사 및 수신하고 거리를 계산하고 저장할 수 있다[그림 3-2].



[그림 3-2] 지상 LiDAR 대상물 스캔 원리



[그림 3-3] FARO s350 지상 LiDAR
(FARO)

[그림 3-2]의 d 는 지상 LiDAR부터 수목 꼭대기까지의 사거리이고, hd 는 수목까지의 수평거리이고 Th 는 측정하는 수목의 높이이며, β 는 측정 수목과의 경사각이며 α 는 측정수목과의 방위각이다.

지상 LiDAR 데이터는 FARO 회사의 FARO FOCUS S350 지상 LiDAR 장치를 이용하여 취득하였다. FARO HD s350 모델은 소형, 초경량 및 원거리 스캐닝 거리로 인해 실외용으로 특별히 설계되어 있다. 360도 * 310도의 상향 시야를 가지며 점군 데이터 채집하는 속도는 초당 976000 점군 이고 스캔 거리 측정정확도는 $\pm 1\text{mm}$ 이고 거리는 10m이며 출구 원형 빔의 직경이 2.12mm이고 발산은 0.3m rad로 구성되어 있다 [그림 3-3].

본 연구에서 가로수를 대상으로 연구했기에 스캔하기 전에 FARO 지상LiDAR를 삼각대에 고정 설치하고 변수를 설정하였다. 실외에서 스캔하기에 연구대상과 지상 LiDAR와의 거리를 20m내로 유지하였으며 수직 스캔 범위를 -60도 부터 90도, 수평스캔 범위를 0도부터 360도로 설정

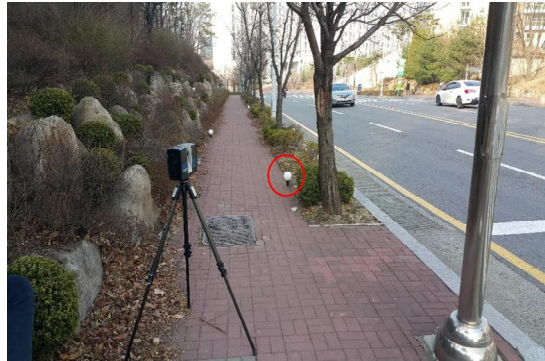
하였다. 해상도를 1/4, quality를 2x로 설정하였는데 한 지점에서 스캔하는데 대략 2분정도 소요되었다.

선정된 28그루의 느티나무와 20그루의 벚나무 데이터는 다중 스캔 방식으로 취득하였다. 다중 스캔방식은 전체 스캔 소요시간이 길지만 비교적 정밀한 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있다.

지상 LiDAR로 수목을 스캔하기 전에 다음과 같은 데이터 수집을 위한 준비를 진행했다. 다중 스캔을 진행하기 위하여 몇 개의 구형 표적물을 배치하여 컨트롤 포인트를 지정하였으며, 이를 활용해 지점별 스캐닝 데이터의 정합을 진행하였다[그림 3-4,5].



[그림 3-4] 느티나무 스캔 현장
(빨간부분: 구형 표적물)



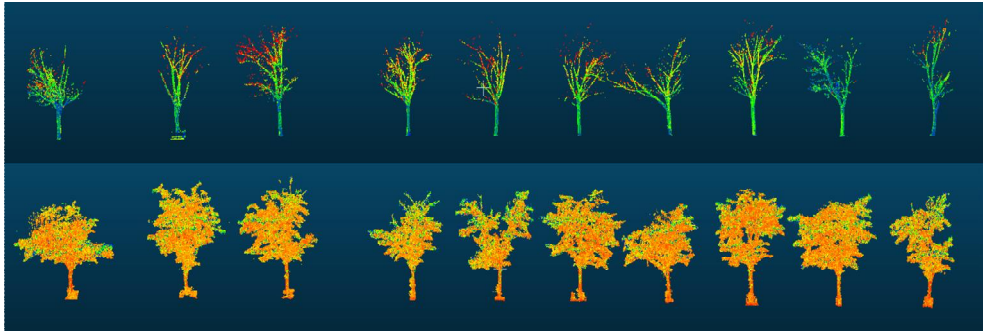
[그림 3-5] 벚나무 스캔 현장
(빨간부분: 구형 표적물)

2. 지상 LiDAR 측량

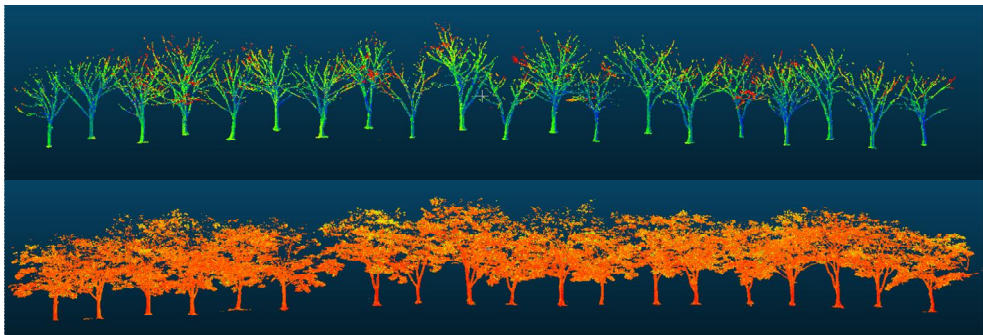
획득한 로우 점군 데이터를 전문 소프트웨어 FARO SCENE에 입력하여 데이터를 보정하는 처리를 진행한다.

보정된 점군데이터의 평균 절대 오차는 2mm에서 10mm이다. 데이터 좌표 보정을 한 후에 주요 연구 대상인 수목들을 점군데이터에서 분리되어 대부분의 노이즈(Noise) 및 관련 없는 데이터를 제거하였다.

노이즈 제거 방법으로 사용자 본인이 정의하는 노이즈 필터 법이랑 통계적 특이된 수치를 제거하는 SOR필터법이 있다. 이러한 방법을 이용할 때 오픈(Open)소스로 제공된 Cloud compare에서 처리하거나 Matlab을 이용하여 처리 필터링을 진행했다.



[그림 3-7] 지상 LiDAR 스캔된 벗나무 점군데이터
(위: 낙엽기 밑 : 착엽기)



[그림 3-6] 지상 LiDAR 스캔된 느티나무 점군데이터
(위: 낙엽기 밑: 착엽기)

제4절 연구방법

본 연구에서 지상 LiDAR 기반으로 기존의 입목체적 산출 방식인 Smalian식과 한국 수목 상대생장식을 적용하였다. 취득된 점군데이터를 복셀화 하여 수목의 실제 형상을 반영하고 복셀(Voxel)수를 기록하여 수목의 부위별의 부피를 추정 한 뒤 비교분석하였다.

1. 지상LiDAR 데이터 전처리

1) 단일 수목 추출

수목의 매개변수로 흉고직경 수고를 추출하기 위하여 먼저 수치지형모델(DEM)을 활용하여 경사를 보정하였고[그림 3-8] Cloud Compare 소프트웨어를 이용하여 Segmentation의 방법으로 단일 수목의 점군데이터를 반자동으로 추출하였다[그림 3-9].



[그림 3-8] 경사보정 처리과정
(왼쪽: 경사보정 전, 오른쪽: 경사보정 후)



[그림 3-9] 개별목 점군데이터 추출결과
(왼쪽:낙엽기 오른쪽:착엽기)

2) 흉고직경 추출

Hough Transform Circle fitting 및 Cylinder fitting의 방법은 흉고 직경을 추정하는 데 널리 사용되는 방법이다.

Hough 변환이론은 Illingworth and Kittler(1998), Princen et al.(1992)에서 다음과 같은 식으로 설명한다(식1).

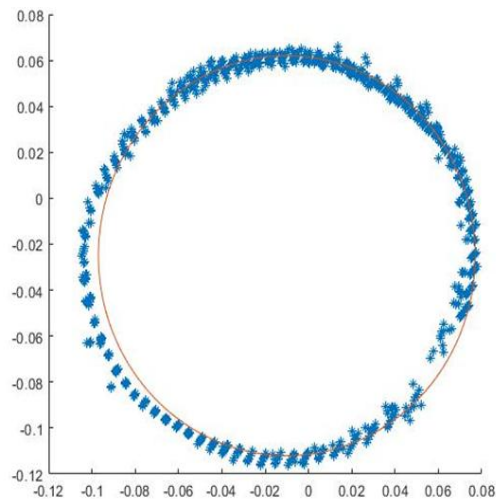
$$r^2 = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 \quad \text{식1}$$

r는 원의 반경이고 x_i 와 y_i 는 원 변두리에 있는 점이며 a, b는 원 중심의 좌표이다.

Hough Transform은 주로 검출 방법이며 측정 방법으로 사용되어 있다. 연구에서 Hough Transform에 의해 점군데이터의 가능한 직경 범위를 얻기 위하여 미리 정의된 반경을 가진 원을 식별하여 공간에서 원 형태로 간주할 수 있는 점군데이터의 수량을 결정하기 위해 미리 임계치를 설정하였다. Cylinder fitting은 비선형 최소 제곱근 Gauss-Newton 함수를 사용하였다. (Nocedal,2006) 김종원(2006)에 의하면 일반적으로 수목의 흉고직경을 지표면 이상 1.3m 위치에 있는 부분으로 정의되어 있다.

본 연구에서 Hough Transform을 활용하여 수간부 1.3m 높이에서 단면을 잘라 직경을 추정하였다. Cylinder fitting은 비선형 최소 제곱근 Gauss-Newton 함수를 사용하여 추정된다(Nocedal, 2006). 김종원 (2006)에 의하면 일반적으로 수목의 흉고직경을 지표면 1.3m 위치에서의 수간부 단면의 직경으로 정의되어 있다.

전처리하여 얻은 데이터를 Matlab으로 불러와 흉고직경 분석을 진행했다. 수목의 z축을 따라 1.28m~1.32m 위치한 수간 부분의 점군데이터를 추출하였으며, 추출된 3차원 점군 데이터를 2차원인 xy 좌표계 평면에 투영화 한 뒤 Hough Transform Circle fitting을 적용하여 수목별 흉고직경을 추정하였다[그림 3-10].



[그림 3-10] 흉고직경 추출 과정
(x축: 직경 y축: 직경)

3) 수고 추출

수고 추출은 단일 수목의 점군데이터의 최고점과 최저점의 차이점으로 추출되었다.

$$h = z_{\max} - z_{\min} \quad \text{식2}$$

2. 수목의 부위별 재적 추정

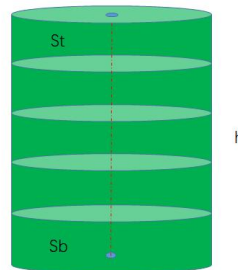
1) 지상 LiDAR 측량에 의한 수간부 재적 추정

본 연구에서 수목의 수간부 재적 추정을 하기 위하여 원래 산림측량 쪽에서 항상 사용되는 Smalian(스말리안)식 그리고 계층별로 수간 재적 측정, 및 복셀 기반으로 수간 재적을 추정하는 것을 진행하였다.

1.1) Smalian식에 의한 수간부 재적 추정

$$V = (S_t + S_b)/2 * h = (\pi D_t^2/4 + \pi D_b^2/4)/2 * h \quad \text{식3}$$

위 식에 있는 V는 수간의 재적, St와 Sb는 원구 단면적과 말구 단면적이며, h는 수간 부분의 길이이며 Dt와 Db는 각 원구 직경과 말구 직경이다[그림 3-11].

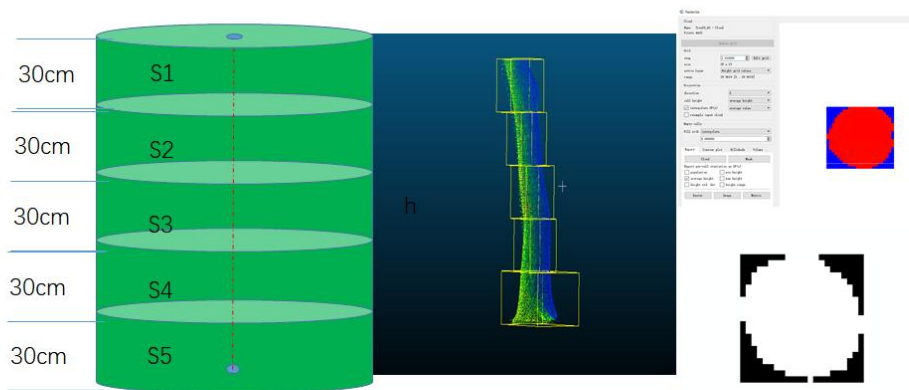


[그림 3-11] 수간부 응용된 Smalia 식 (St: 원구단면적, Sb: 말구 단면적, h: 수간부 높이)

Smalian식은 수간의 상하부 직경을 구하는 것을 통하여 비교적 정확하게 두 근원 부의 횡단면적을 얻을 수 있다[그림3-11]. 현장 조사에서

실제로 파괴식으로 수목을 벌채하여 양쪽 두 근원 직경을 측정하는 방식으로 활용되는데, 이러한 과정에서 인력과 시간 소모가 비교적 크고 측정자에 따라 오차도 크게 나타날 수 있을 뿐 아니라 도시 내부 지역에서 수목 벌채는 현실성이 매우 낮다. 지상 LiDAR 장비로 고정밀로 수간부의 데이터를 획득할 수 있고 수간부의 실제 형상을 점군데이터를 통하여 재현할 수 있으며 흉고직경 추출 알고리즘을 통하여 대응된 변수를 추출하였다.

1.2) 계층화 방식에 의한 수간부 재적 추정



[그림 3-12] 개별목 수간부 처리과정
(S1-S5:각 층의 면적)

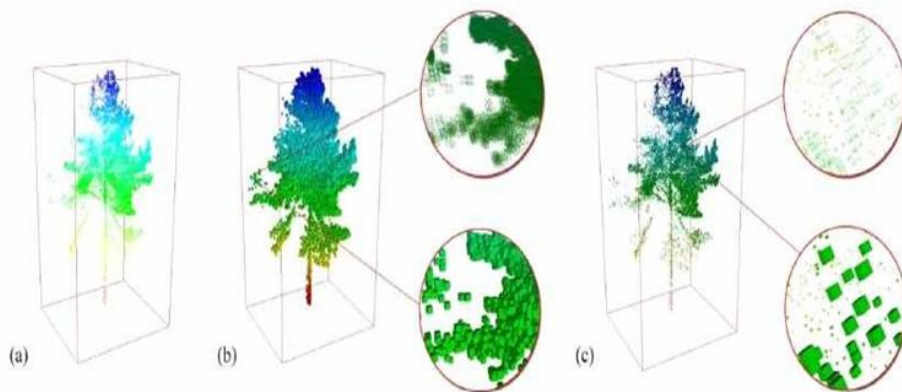
지상 LiDAR기반으로 스캔을 진행하여 얻은 점군데이터에서 수목 수간부의 점군데이터를 계층화 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 연구에서 수간부를 높이 또는 높이계층별로 분할하고 점군데이터의 빈 내부공간을 래스터화 하는 보간하는 방법으로 수목의 수간 재적 식에 필요한 변수를 계산하였다. 이를 위해 Cloud Compare의 툴에서 래스터화 하였으며,

점군데이터 상 빈 부분을 내삽하고 Arcgis 상에서 셀 개수를 계산하여 수간부의 총 재적을 추정하였다[그림 3-12].

1.3)Voxel화 방식에 의한 수간부 재적 추정

Voxel모델은 3차원 공간인 그리드를 의미한다(Ben and Norbert,2004). Hosoi and Omasa(2013)는 레이저 LiDAR데이터를 기반으로 복셀화(Voxel) 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 위에 제안한 3차원 복셀화(Voxelization)를 적용하여 점군데이터를 다양한 Voxel 크기로 변환하였다.



[그림 3-13] 복셀화 처리 과정

2)지상 LiDAR 측량에 의한 가지부 재적 추정

가지 부 재적을 추정하는데 기존 산림청에서 사용했던 상대생장식 및 서울시를 대상으로 개발된 수목의 재적 식을 사용하여 얻어진 목질 부분의 재적으로 가지 부분의 재적을 추출하여 참조 데이터로 하였다(손영모, 2016).

2.1) 상대 생장식을 통한 가지부 재적 추정

손영모(2016)는 서울시의 가로 조경수를 연구대상으로 수목의 재적 식을 개발하였다. 본 연구에서는 개발된 재적식을 통해 선행연구에서 사용하였던 Smalian식으로 추출된 수간 재적 결과에 결합하여 간접적으로 가지부의 재적을 도출하여 참조데이터로 하였다(식4).

$$\text{가지 부(Brach)재적} = \text{상대생장식(수목재적)} - \text{Smalian(수간재적)} \quad \text{식4}$$

2.2) Voxel화 방식에 의한 가지부 재적 추정

취득된 단일 수목의 점군데이터를 수동으로 가지 부분의 점군데이터를 분류하였다. 마찬가지로 점군데이터의 복셀화를 통해 가지부의 재적을 추정하였다.

제4장 결과 및 고찰

본 연구에서는 느티나무 28그루, 벚나무 20그루를 단일 수목 기준에서 부위별로 추정된 재적 결과에 대해서 비교연구를 진행하고 필요한 수목의 매개변수인 흉고직경과 수고의 정확성에 대해서 추가로 비교 검증하였다.

제1절 부위별 재적량 산정 결과

수목의 재적은 임의의 입목재, 통나무, 원목, 원조, 플레이트 스퀘어 등의 목재의 체적을 의미한다. 일반화된 재적은 가지, 절단 등이 포함되어 있다. 또한, 수목의 재적은 바이오매스량 및 탄소저장량 계산의 중요한 매개 변수이기도 하다.

따라서 본 연구에서는 지상 LiDAR 기반으로 서로 다른 산정 방법을 결합하여, 추출된 느티나무, 벚나무의 수간(Stem)부 및 가지 부(Branch)의 재적에 대하여 수종별 그리고 생장 형태의 따라서 연구고찰을 진행하게 되었다.

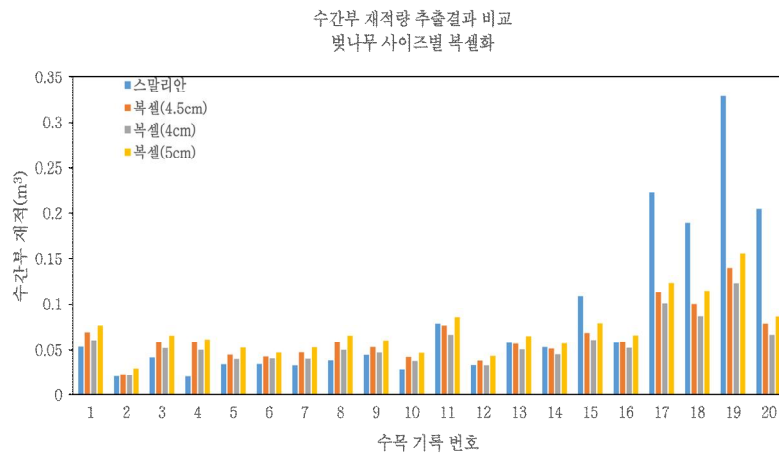
1.1) 수간부 재적

위에 지상 LiDAR 기반 흉고직경 추출된 정확도를 근거로 수목의 수간부 재적을 산정하는데 필요한 수목 수간 부분의 근원직경과 말구직경을 산정하는데 동일한 알고리즘을 사용하여 추출하게 되었다.

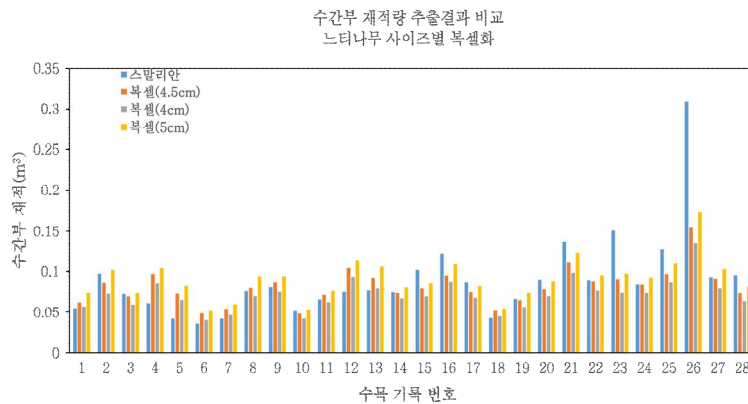
기존에 산림 경영학 및 산림청에서 산림 측정하는 데 항상 사용하게 된 스말리안(Smalian) 식으로 추출된 수간 부 재적을 참고 데이터로 하였고 이를 Voxel화 방법 및 계층화 방법으로 얻은 수간 부의 재적과 비교를 진행하게 되었는데 주요하게 수목의 종류, 형태 크기 다양한 산정 방식으로 얻은 재적 지간의 차이를 고찰하게 되었다.

복셀화 방법으로 수목의 수간 재적을 추정하는데 다양한 크기를 설치

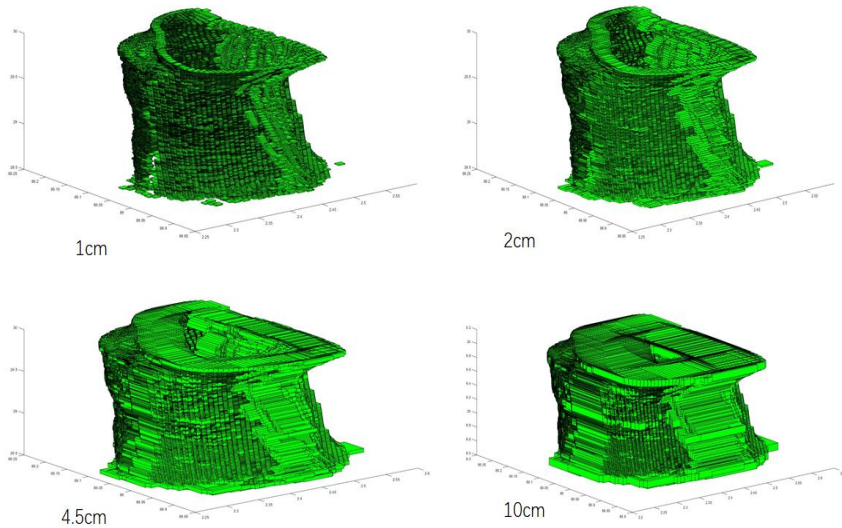
하여 고찰을 진행하게 되었는데 4.5cm로 설정하였을 때 기존의 방법에 가장 근접한 것으로 나타났다.



[그림 4-1] 벗나무 사이즈별 복셀화 추출결과



[그림 4-2] 느티나무 사이즈별 복셀화 추출결과



[그림 4-3] 사이즈별 복셀화 이미지 결과

[그림 4-3]에서 보이다시피 Voxel화 과정에서 Interpolation 하지 않았을 때에 4.5cm로 된 복셀 크기는 원래 모양과 형태에서 큰 변화 없는 동시에 내부 여유 공간이 비교적 많이 채워져 있었다. 반대로 복셀사이즈를 1cm로 설정하였을 때에는 원래 모양 형태를 잘 보존 할 수 있지만 데이터의 내부 공간은 많이 비어 있다.

이것은 복셀형태의 크기가 상대적으로 너무 작아서 내부 빈 공간을 채울 수 없게 되어 참조 데이터랑 비교하였을 때 비교적 큰 차이가 나타나게 되었다. 복셀 사이즈를 10cm로 설정하였을 때 내부공간은 비교적 가득하게 채웠지만 수목의 수간 형태 봤을 때에는 이미 큰 변화가 생겼으며 참조데이터랑 비교 하였을 때 역시 결과값의 차이가 컸다.

지상 LiDAR 기반 스말리안식(a), 복셀화(b), 계층화(c) 방법으로 산정된 느티나무, 벚나무의 수간 재적에 대하여 고찰하였다[그림 3-4][그림 3-5]. 느티나무와 벚나무의 계층화 한 후에 추출된 재적을 참고데이터랑 비교하였다.

<표 4-1> 느티나무 수간 재적 추정 결과

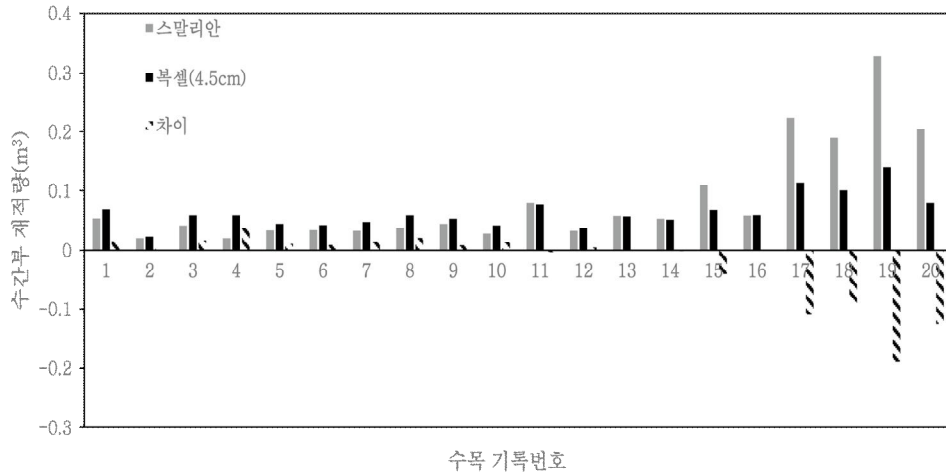
수목 번호	스말리안식(a)(m³)	복셀화 방식(4.5c m)(b)	상대적 비율 차이(b-a/ a)	계층화 방식(c)(m³)	상대적 비율 차이(c-a/a)
1.	0.055	0.062	12.72%	0.065	18.96%
2.	0.097	0.085	-12.17%	0.100	2.84%
3.	0.071	0.069	-3.83%	0.053	-25.18%
4.	0.061	0.096	58.91%	0.078	28.46%
5.	0.042	0.072	71.95%	0.042	0.51%
6.	0.036	0.048	35.18%	0.059	65.65%
7.	0.042	0.054	28.68%	0.034	-18.12%
8.	0.076	0.079	4.65%	0.080	5.05%
9.	0.081	0.086	6.49%	0.065	-19.61%
10.	0.051	0.048	-5.85%	0.045	-12.56%
11.	0.065	0.071	8.34%	0.049	-24.91%
12.	0.075	0.104	38.26%	0.084	11.85%
13.	0.077	0.091	18.33%	0.064	-16.05%
14.	0.075	0.073	-1.88%	0.040	-47.09%
15.	0.102	0.079	-22.34%	0.071	-29.74%
16.	0.122	0.095	-22.26%	0.084	-31.32%
17.	0.086	0.075	-13.04%	0.058	-32.83%
18.	0.043	0.051	20.17%	0.035	-19.29%
19.	0.066	0.064	-2.42%	0.056	-14.25%
20.	0.089	0.078	-11.89%	0.057	-35.41%
21.	0.137	0.011	-19.01%	0.122	-10.33%
22.	0.088	0.087	-1.31%	0.099	12.16%
23.	0.151	0.089	-40.85%	0.088	-41.54%
24.	0.083	0.084	0.20%	0.075	-9.70%
25.	0.127	0.097	-24.00%	0.135	6.59%
26.	0.309	0.154	-50.08%	0.185	-40.02%
27.	0.092	0.090	-1.94%	0.125	36.67%
28.	0.095	0.073	-23.60%	0.097	2.21%

분석과정에서 산정된 차이 값은 표에 나타난 것과 같다 <표 4-1,2>.

<표 4-2> 벗나무 수간 재적 추정 결과

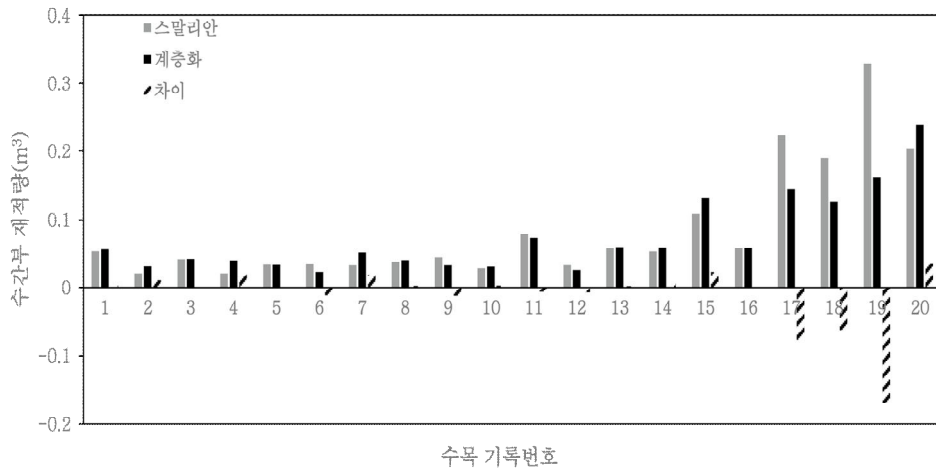
수목 번호	스말리안식(a)(m ³)	복셀화 방식(4.5c m)(b)	상대적 비율 차이(b-a/ a)	계층화 방식(c)(m ³)	상대적 비율 차이(c-a/a)
1.	0.054	0.069	29.18%	0.056	5.42%
2.	0.021	0.023	11.72%	0.031	50.59%
3.	0.042	0.059	39.76%	0.042	0.44%
4.	0.021	0.059	183.57%	0.040	93.83%
5.	0.034	0.045	32.36%	0.033	-1.36%
6.	0.034	0.043	25.19%	0.023	-33.04%
7.	0.033	0.047	44.76%	0.052	57.51%
8.	0.038	0.059	55.18%	0.040	6.32%
9.	0.045	0.053	19.13%	0.033	-26.99%
10.	0.028	0.042	49.06%	0.031	9.54%
11.	0.079	0.076	-3.67%	0.073	-7.79%
12.	0.033	0.038	14.19%	0.026	-21.54%
13.	0.058	0.057	-1.44%	0.060	3.17%
14.	0.053	0.052	-2.87%	0.059	10.34%
15.	0.109	0.069	-37.10%	0.132	21.04%
16.	0.058	0.059	1.64%	0.058	0.43%
17.	0.223	0.113	-49.13%	0.145	-34.77%
18.	0.190	0.101	-47.08%	0.127	-33.19%
19.	0.329	0.140	-57.49%	0.161	-51.22%
20.	0.204	0.079	-61.23%	0.239	16.94%

산정방식에 따른 수간부 재적량 결과 비교
벗나무 복셀화



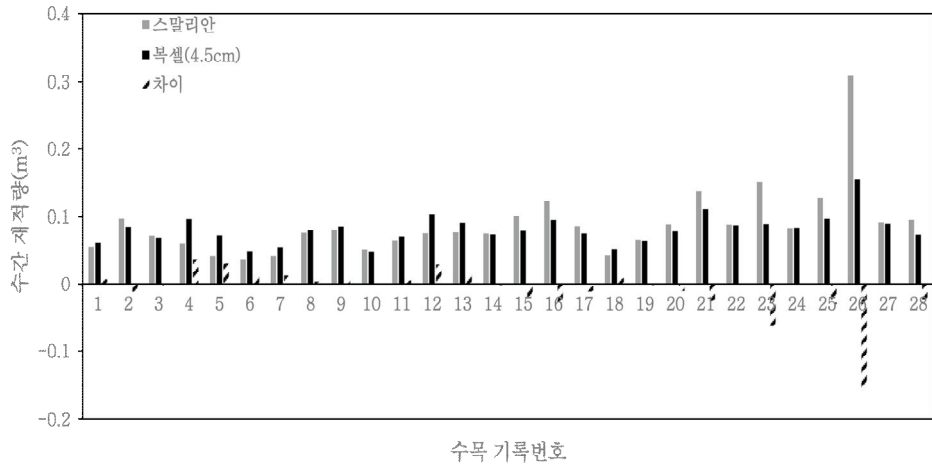
[그림 4-4] 벗나무 수간부 재적량: 스말리안식과 복셀화
방식간의 추정값 비교

산정방식에 따른 수간부 재적량 비교분석 결과
벗나무 계층화



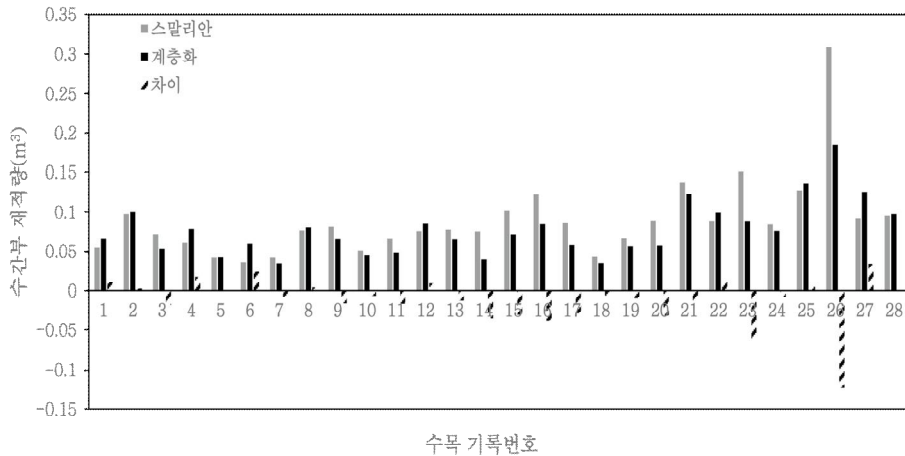
[그림 4-5] 벗나무 수간부 재적량: 스말리안식과 계층화
방식간의 추정값 비교

산정방식에 따른 수간부 재적량 비교분석 결과
느티나무 복셀화

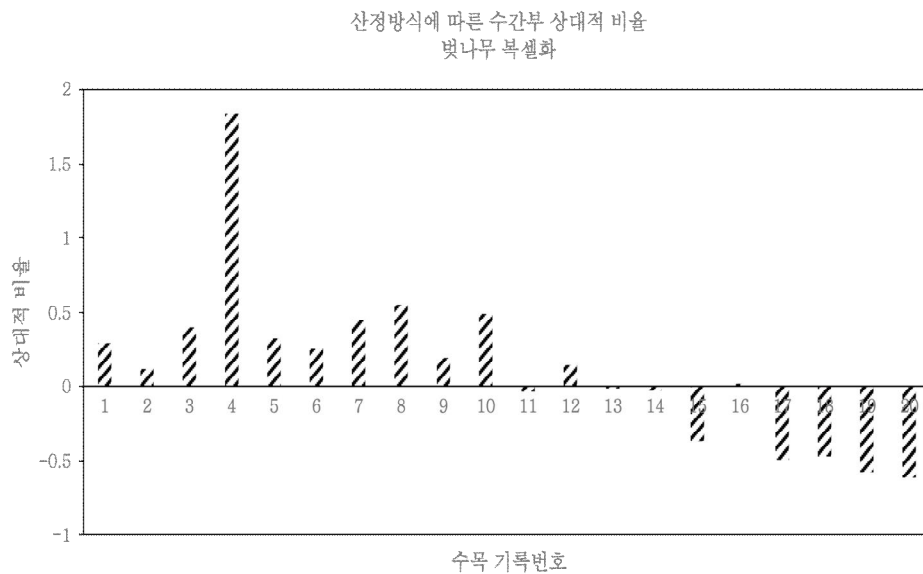


[그림 4-6] 느티나무 수간부 재적량: 스말리안식과 복셀화
방식간의 추정값 비교

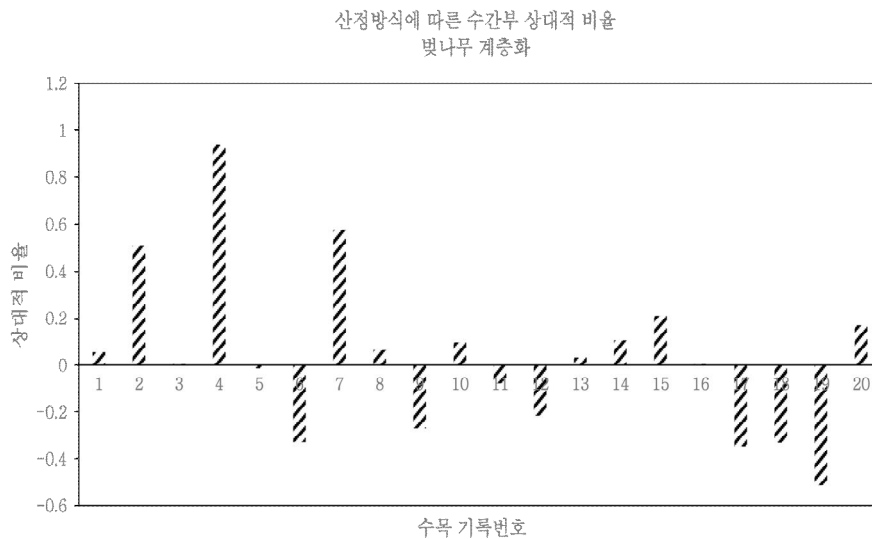
산정방식에 따른 수간부 재적량 비교분석 결과
느티나무 계층화



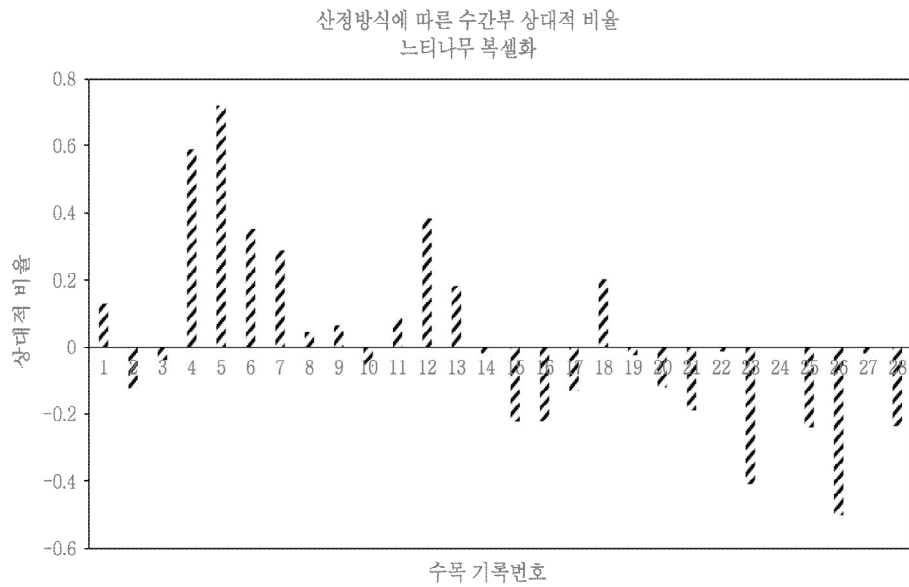
[그림 4-7] 느티나무 수간부 재적량: 스말리안식과 계층화
방식간의 추정값 비교



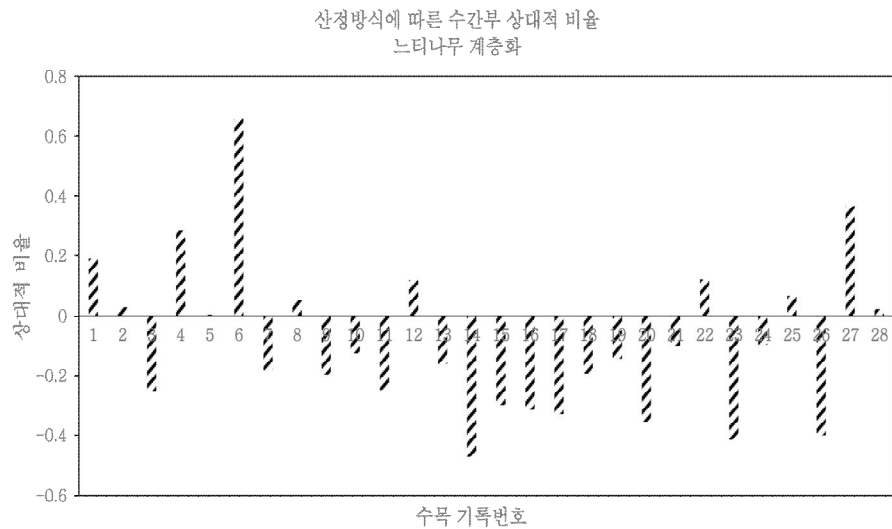
[그림 4-8] 벗나무 수간부 복셀화 상대적 비율 차이($b-a/a$)



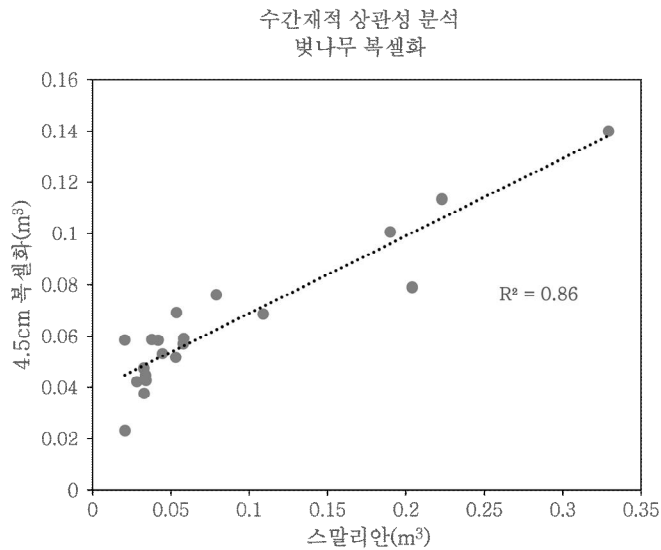
[그림 4-9] 벗나무 수간부 계층화 상대적 비율 차이($c-a/a$)



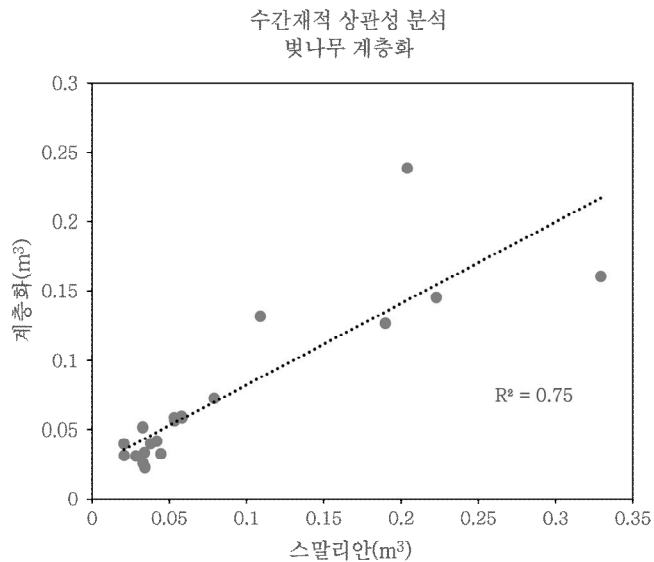
[그림 4-10] 느티나무 수간부 복셀화 상대적 비율
차이($b-a/a$)



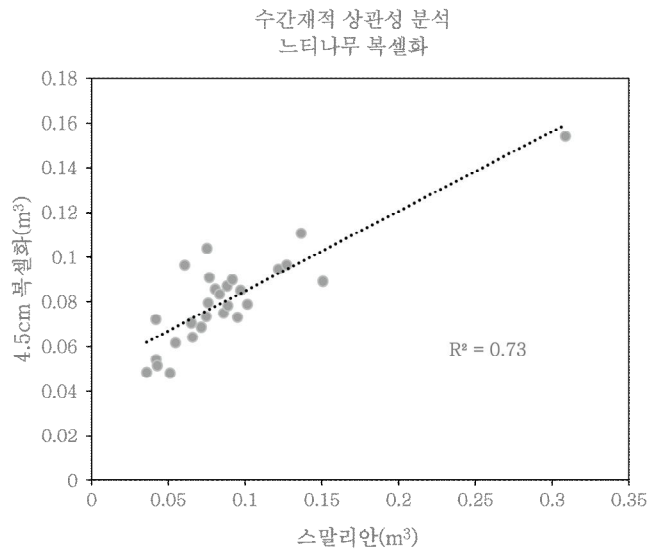
[그림 4-11] 느티나무 수간부 계층화 상대적 비율
차이($c-a/a$)



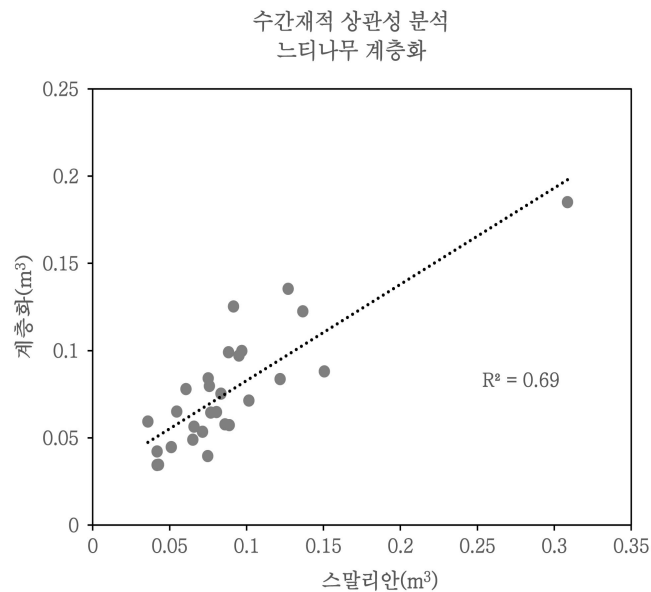
[그림 4-12] 스말리안식과 복셀화 4.5cm
방식에 따른 수간부 재적 상관성 분석
결과(벗나무 경우)



[그림 4-13] 스말리안식과 계층화 방식에
따른 수간부 재적 상관성 분석 결과(벗나무
경우)



[그림 4-14] 스말리안식과 복셀화 4.5cm 방식에 따른 수간부 재적 상관성 분석 결과 (느티나무 경우)

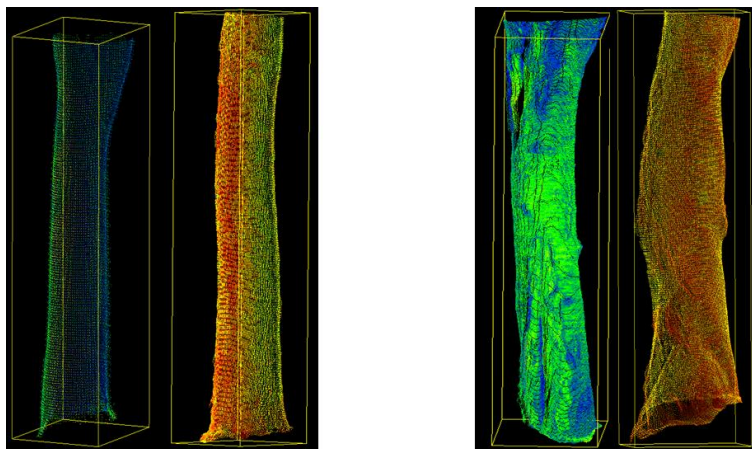


[그림 4-15] 스말리안식과 계층화 방식에 따른 수간부 재적 상관성 분석결과(느티나무 경우)

느티나무의 수간 부위를 복셀화로 산정된 재적이 스말리안식으로 산정된 재적에 비했을 때 25.79% 증가하고, 16.03% 낮게 나타났으며 계층화로 산정하는데 17.36% 증가하고, 25.17% 낮았다.

벚나무의 수간 부위를 복셀화로 산정된 재적이는 42.14% 증가하고, 26.24% 낮았다. 통계 데이터 및 결과 그림에서, 4.5cm로 설정된 Voxel화의 방법의 결과값이 참조데이터랑 비교하였을 때에 부분값은 낮게 나타나게 되었고 부분값은 높게 나타나게 되었다. 기존에 가설된 부분에 대비하여 수간 부의 형태를 원시 점군데이터에서 고찰하게 되었다. 수목 수간 부의 계층화 방법은 Cylinder방식을 변형하여 수간 부의 점군데이터를 계층별로 잘라서 비 파괴 식으로 점군데이터를 통해 수간 부의 재적을 산정하는 것이다.

상관관계 분석에서는 느티나무와 벚나무의 계층화 된 재적의 R2값이 0.69, 0.75이고 3D Voxel화 재적의 R2값이 각각 0.73, 0.86으로 도출되었다[그림 4-12,13,14,15].



[그림 4-16] 수종별 실제 점군데이터
(왼쪽:느티나무, 오른쪽: 벚나무)

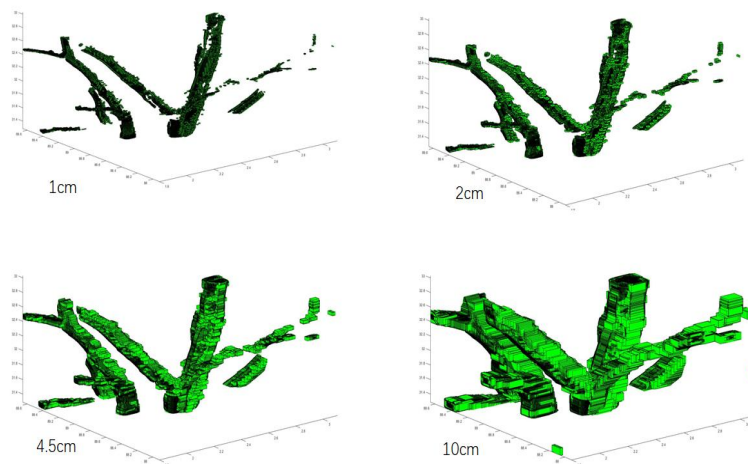
스말리안식으로 산정된 재적 결과에 비하여 높게 나타난 데이터의 수목의 수간부는 비교적 수직적으로 되어 있지만, 말구 직경에 분기의 연

결된 부분이 형성되어있고 낮게 나타난 데이터의 수목의 수간부는 비교적 울퉁불퉁하게 생겼고 부분적으로 나선형 형태가 나타났다[그림 4-16].

1.2) 가지부 재적

본 연구에서, 지상 LiDAR기반으로 얻은 데이터로 벗어나와 느티나무의 가지 부재적을 추정하는 데 과정상 가장 효과적인 방법은 복셀화로 상대생장식에 의해 얻은 가지 부의 재적을 참조데이터 으로 하여 비교검증을 진행하였다.

복셀화 방법으로 산정했을 때 수간 부 추정하는데와 같은 방법으로 산정했으며 복셀 크기의 다름에 따라서 산정값이 다르게 나타났다[그림 3-10]. 동한 Voxel사이즈로 설정하였을 때 실제적으로 반영된 그림 결과이다. 사이즈를 1cm로 설정하였을 때 추정된 가지부의 재적이 참조데이터랑 비교하였을 때 제일 접근하는 것으로 나타났다.



[그림 4-17] 사이즈 별 가지부 복셀화 추출 결과

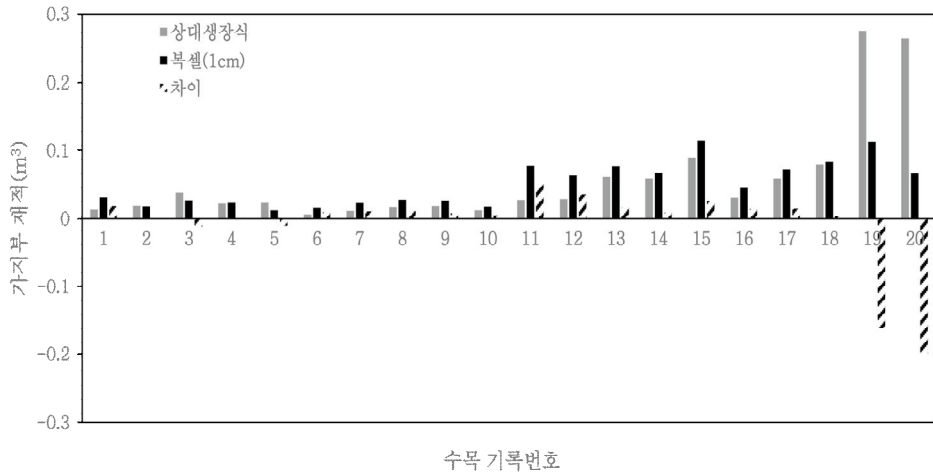
<표 4-3> 느티나무 가지부 재적 추정 결과

수목 번호	상대생장식-스말리안 식(m³)(f)	복셀화(1cm)(e)	상대적 비율 차 이(e-f/f)
1.	0.069	0.047	-31.95%
2.	0.058	0.050	-13.54%
3.	0.038	0.053	40.03%
4.	0.095	0.064	-32.11%
5.	0.047	0.051	7.31%
6.	0.044	0.043	-2.61%
7.	0.067	0.059	-11.03%
8.	0.109	0.121	10.64%
9.	0.087	0.047	-45.92%
10.	0.050	0.051	0.81%
11.	0.084	0.119	42.49%
12.	0.063	0.058	-8.44%
13.	0.096	0.063	-34.91%
14.	0.105	0.115	10.22%
15.	0.077	0.115	49.51%
16.	0.048	0.060	25.76%
17.	0.052	0.065	23.72%
18.	0.077	0.067	-12.41%
19.	0.043	0.032	-25.29%
20.	0.065	0.064	-2.31%
21.	0.072	0.060	-17.00%
22.	0.098	0.075	-23.54%
23.	0.085	0.077	-9.74%
24.	0.112	0.080	-28.50%
25.	0.153	0.092	-39.89%
26.	0.137	0.110	-19.24%
27.	0.112	0.099	-11.53%
28.	0.108	0.079	-26.90%

<표 4-4> 벗나무 가지부 재적 추정 결과

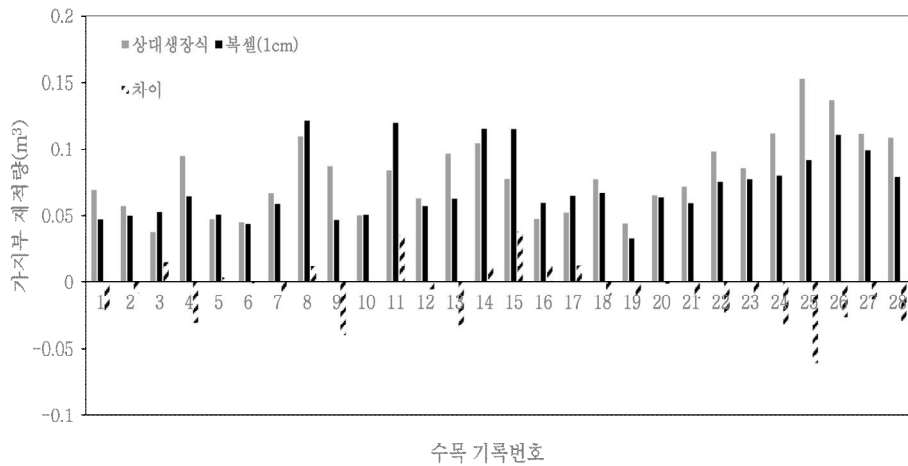
수목 번호	상대생장식-스탈리안식 (m ³)(f)	복셀화(1cm)(e)	상대적 비율 차이(e-f/f)
1.	0.013	0.030	134.24%
2.	0.018	0.017	-5.37%
3.	0.037	0.026	-30.99%
4.	0.021	0.022	5.30%
5.	0.022	0.012	-46.42%
6.	0.006	0.015	147.63%
7.	0.011	0.022	95.21%
8.	0.016	0.027	68.50%
9.	0.017	0.025	46.43%
10.	0.012	0.017	39.45%
11.	0.026	0.077	191.91%
12.	0.028	0.062	123.41%
13.	0.060	0.076	26.00%
14.	0.058	0.066	15.40%
15.	0.089	0.114	28.20%
16.	0.030	0.044	45.78%
17.	0.058	0.072	24.18%
18.	0.079	0.082	4.44%
19.	0.275	0.113	-59.03%
20.	0.264	0.065	-75.39%

산정방식에 따른 가지부 재적량 비교분석 결과
벚나무 복셀화

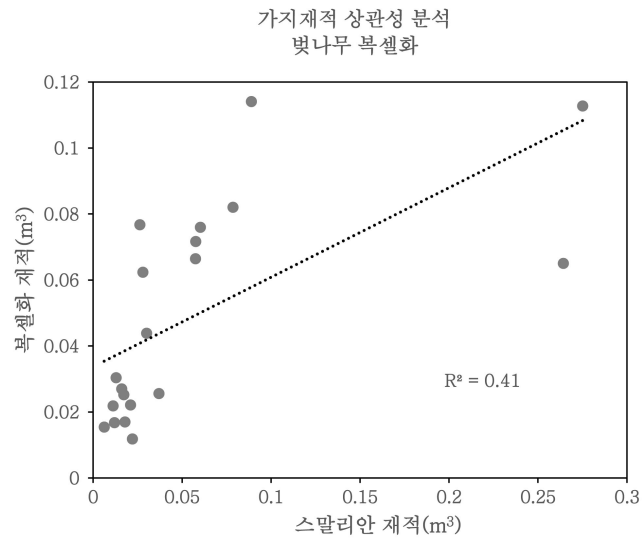


[그림 4-18] 벚나무 가지부 재적량: 상대성장식과 복셀화
방식간의 추정값 비교결과

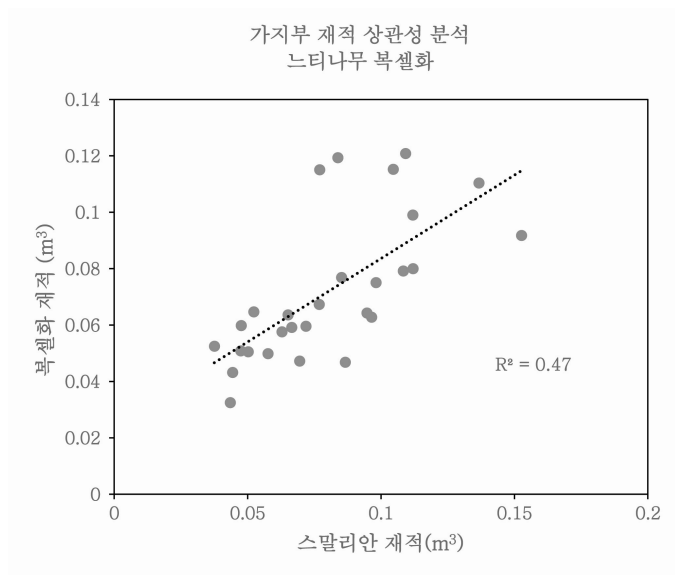
산정방식에 따른 가지부 재적량 비교분석 결과
느티나무 복셀화



[그림 4-19] 느티나무 가지부 재적량: 상대성장식과 복셀화
방식간의 추정값 비교결과



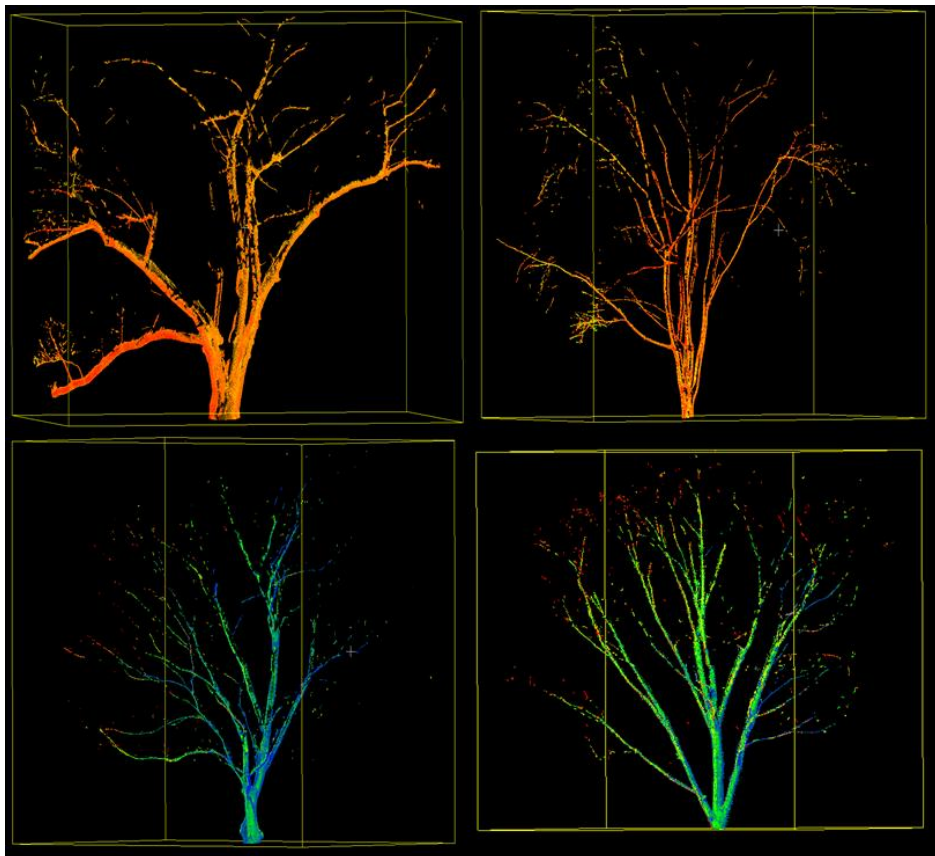
[그림 4-20] 스말리안식과 복셀화 방식에 따른
가지부 재적 상관성 분석결과(벗나무 경우)



[그림 4-21] 스말리안식과 복셀화 방식에 따른 가
지부 재적 상관성 분석결과(느티나무 경우)

벗나무의 가지 부위를 복셀화로 산정된 재적이 스말리안식으로 산정된 재적에 비했을 때 66.40% 증가하고, -43.44% 낮게 나타나게 되었고 느티나무의 가지 부위를 복셀화로 산정하는데 24.98%증가하고, -20.89% 낮아졌다.

수종별로 가지 부위 산정결과 봤을 때에 벗나무의 상대 증감 비율이 느티나무의 상대 증감 비율보다 크게 나타났다. 이는 실제 점군데이터를 봤을 때에 벗나무의 가지 부의 형성하는 데 많은 지조량이 부착되었거나 느티나무의 구조보다 성장하는데 복잡 하는 것으로 판단된다.



[그림 4-22] 수종별 실제 점군데이터
(위: 벗나무, 밑: 느티나무)

비교 결과를 봤을 때에 상대적 비율이 증가하거나 감소하게 되는 현상

을 나타냈다. 실제 스캔 된 점군데이터에 결합하여 봤을 때에 가지 부에 연결된 지조량이 적을 때 에 복셀화 산정값이 상대적으로 낮아졌고 연결된 지조량이 비교적 많았을 때에 산정값이 상대적으로 값으로 나타났다.

때문에 지상 LiDAR를 통해 얻은 실제 추출 결과를 봤을 때에 수종별로 가지 부의 지조량을 더 세부적으로 추출하며 재적을 산정 할 수 있다고 판단된다.

상관성 분석결과 나무 R2값은 0.41이고 느티나무의 R2값이 0.47이었다 [그림 4-20,21]. 이는 수간재적의 분석 결과에 비하여 비교적 낮은 결과이다. 원인은 연구에서 가지 부 재적을 구하는데 참조용으로 사용하는 데이터가 직접 추출 된 것이 아닌 기존에 개발하게 된 상대 생장식을 적용하여 간접 식으로 추출된 결과를 이용하였다. 따라서 지상 LiDAR의 결과와 비교했을 때 수종별로 비교적 유의한 차이가 나타날 수 있고 이는 가지부의 복잡성에 영향을 받는 것으로 판단된다.

1.3) 옆층부 체적

일반화된 점군데이터의 처리 방법으로 낙 엽기 및 착 엽기 점군데이터로 Voxel화 이론에 결합해 옆 체적이 산정되었다<표4-5>.

<표 4-5> 지상 LiDAR기반 산정 된 옆층부 체적

수목 번호	느티나무(m³)	수목 번호	벚나무(m³)
1.	0.017	1.	0.019
2.	0.019	2.	0.009
3.	0.011	3.	0.006
4.	0.024	4.	0.006
5.	0.011	5.	0.006
6.	0.008	6.	0.008
7.	0.030	7.	0.009
8.	0.019	8.	0.009
9.	0.026	9.	0.010
10.	0.018	10.	0.007
11.	0.012	11.	0.024
12.	0.020	12.	0.012
13.	0.018	13.	0.033
14.	0.023	14.	0.033
15.	0.024	15.	0.063
16.	0.021	16.	0.023
17.	0.013	17.	0.059
18.	0.011	18.	0.059
19.	0.017	19.	0.167
20.	0.012	20.	0.239
21.	0.023		
22.	0.037		
23.	0.021		
24.	0.024		
25.	0.039		
26.	0.037		
27.	0.036		
28.	0.028		

본 연구에서는 옆 체적을 산정하는데 기존에 참조 데이터가 없어서 옆층부 체적 산정은 검증을 진행하지 못했다. 향후 연구 진행이 이루어져야 할 부분이다.

1.4) 수목 지상부 바이오매스

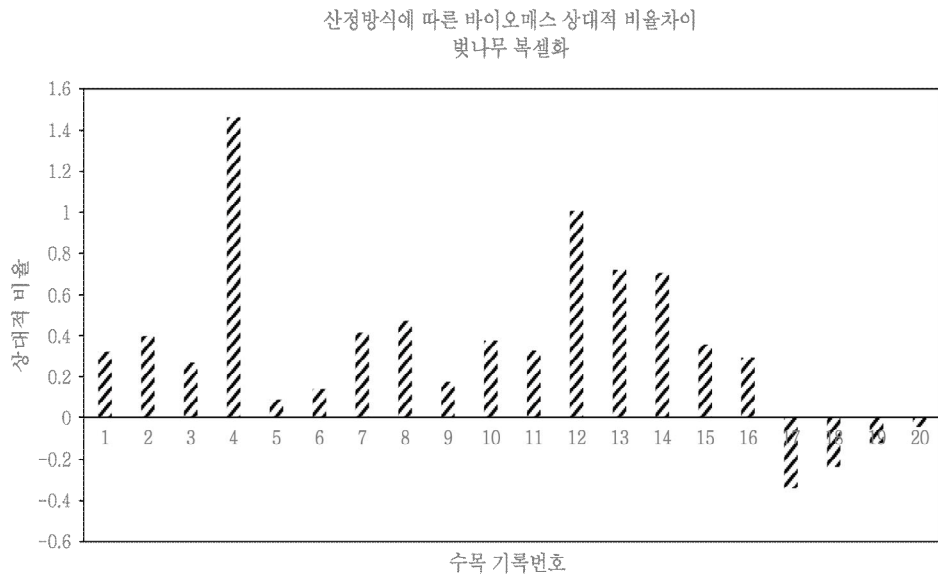
기존의 산림 바이오매스 산정할 때에 많이 쓴 옆, 가지 부분도 포함하는 바이오매스 산정 식을 이용하여 지상 LiDAR 기반으로 산정된 착엽기의 바이오매스 결과와 비교하였다[표 3-8][표 3-9][그림 3-11].

<표 4-6> 느티나무 바이오매스 산정결과

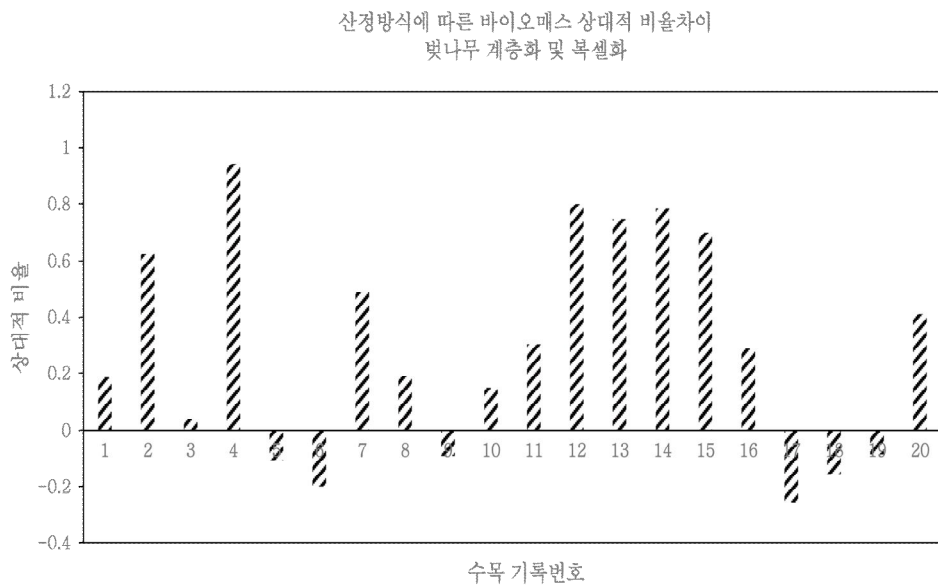
수목 번호	산림 바이오매스 산정식(d)(Kg)	지상 LiDAR(수간 복셀화(b)+ 가지 복셀화(e))(Kg)	상대적 비율차이 [(b+ e)-d] /d	지상 LiDAR(수간 계층화(c)+ 가지 복셀화(e))(Kg)	상대적 비율차이 [(c+ e)-d]/ d
1.	62.629	82.823	32.24%	74.175	18.44%
2.	24.330	34.007	39.77%	39.506	62.37%
3.	48.965	62.106	26.84%	50.914	3.98%
4.	24.170	59.553	146.39%	46.944	94.22%
5.	39.622	43.164	8.94%	35.397	-10.66%
6.	39.934	45.452	13.82%	31.936	-20.03%
7.	38.363	54.241	41.39%	57.085	48.80%
8.	44.305	65.259	47.29%	52.674	18.89%
9.	52.166	61.369	17.64%	47.385	-9.16%
10.	33.180	45.695	37.72%	38.073	14.75%
11.	92.504	122.738	32.68%	120.521	30.29%
12.	38.551	77.347	100.64%	69.338	79.86%
13.	67.701	116.388	71.92%	118.203	74.60%
14.	62.225	106.099	70.51%	110.877	78.19%
15.	127.446	173.109	35.83%	216.184	69.63%
16.	68.060	88.089	29.43%	87.608	28.72%
17.	260.683	171.918	-34.05%	193.686	-25.70%
18.	222.149	169.791	-23.57%	187.722	-15.50%
19.	385.176	337.978	-12.25%	352.035	-8.60%
20.	238.624	228.027	-4.44%	336.462	41.00%

<표 4-7> 뱃나무 바이오매스 산정결과

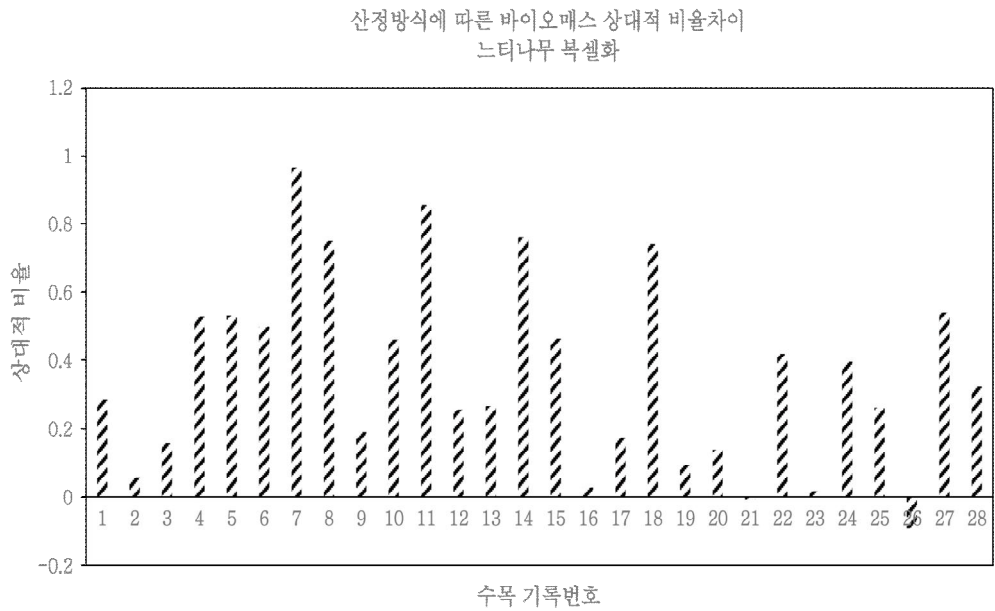
수목 번호	산림 바이오 매스 산정식 (d)(Kg)	(수간 복 셀화(b)+ 가지 복셀 화(e)(Kg)	상대적 비율차이 [(b+ e)-d]/d	(수간 계층 (c)화+ 가지 복셀화 (e))(Kg)	상대적 비율차이 [(c+ e)-d]/ d
1.	64.020	82.243	28.46%	89.298	39.49%
2.	108.468	114.603	5.66%	116.476	7.38%
3.	79.885	92.508	15.80%	80.274	0.49%
4.	67.838	103.755	52.95%	115.497	70.25%
5.	46.870	71.829	53.25%	71.976	53.56%
6.	40.098	60.174	50.07%	76.183	89.99%
7.	46.954	92.292	96.56%	87.118	85.54%
8.	84.896	148.552	74.98%	151.161	78.05%
9.	90.038	107.219	19.08%	96.482	7.16%
10.	57.142	83.521	46.16%	79.154	38.52%
11.	72.789	135.169	85.70%	124.142	70.55%
12.	84.083	105.612	25.61%	111.671	32.81%
13.	85.847	108.722	26.65%	100.341	16.88%
14.	85.589	147.055	75.93%	123.119	47.29%
15.	113.492	166.234	46.47%	145.708	28.39%
16.	136.167	139.961	2.79%	114.028	-16.26%
17.	96.191	112.911	17.38%	93.705	-2.58%
18.	47.904	83.436	74.17%	77.817	62.44%
19.	73.614	80.500	9.35%	74.122	0.69%
20.	99.223	113.044	13.93%	91.676	-7.61%
21.	152.732	151.604	-0.74%	142.007	-7.02%
22.	98.704	140.010	41.85%	147.307	49.24%
23.	168.461	171.419	1.76%	128.857	-23.51%
24.	93.244	130.139	39.57%	124.637	33.67%
25.	142.108	179.332	26.19%	185.026	30.20%
26.	345.131	313.839	-9.07%	229.846	-33.40%
27.	102.451	157.865	54.09%	180.710	76.39%
28.	106.290	140.587	32.27%	142.013	33.61%



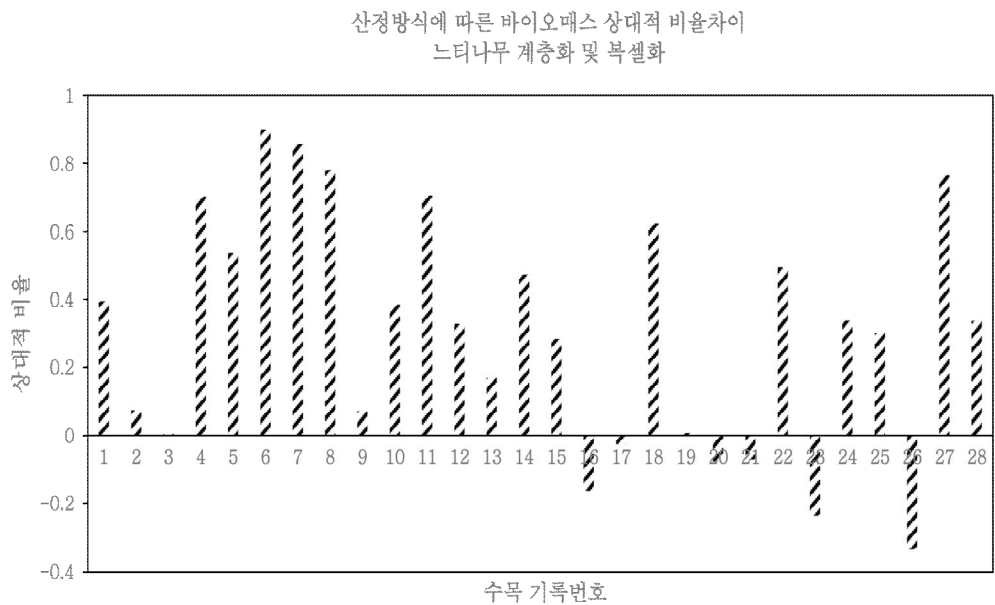
[그림 4-23] 벗나무 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적
비율차이 $[(b+e)-d]/d$



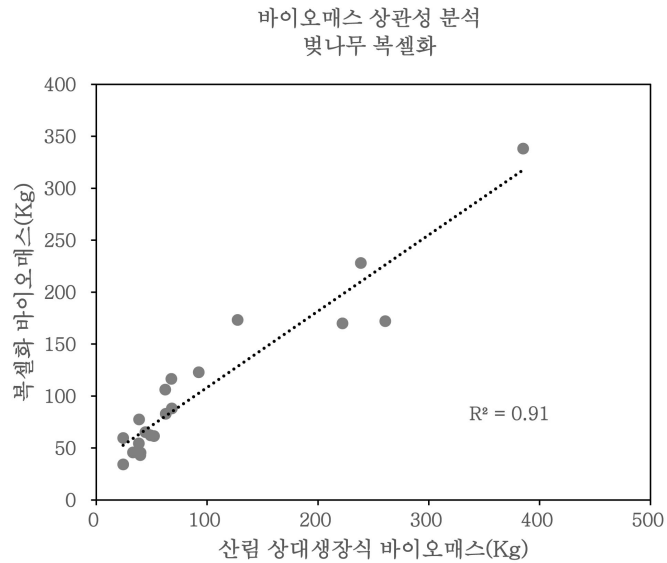
[그림 4-24] 벗나무 계층화 및 복셀화 방식에 통한
바이오매스 상대적 비율차이 $[(c+e)-d]/d$



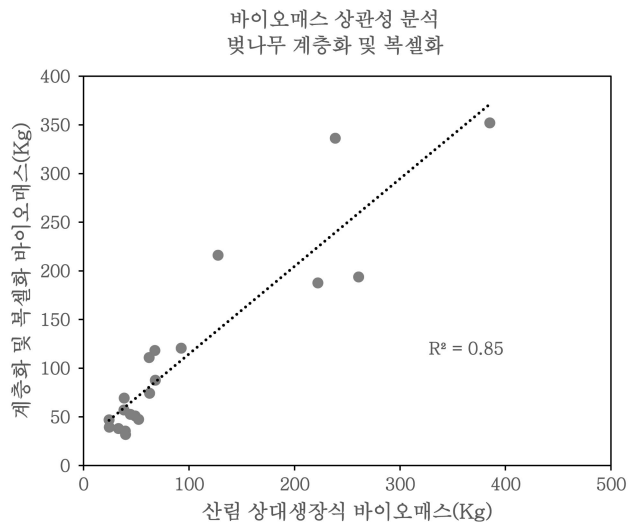
[그림 4-25] 느티나무 복셀화 방식에 통한 바이오매스 상대적
비율차이 $[(b+e)-d]/d$



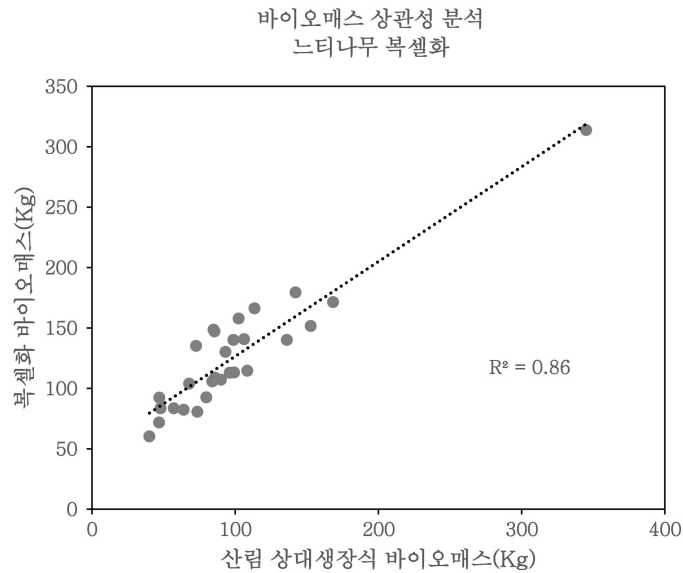
[그림 4-26] 느티나무 계층화 및 복셀화 방식에 통한 바이오매스
상대적 비율차이 $[(c+e)-d]/d$



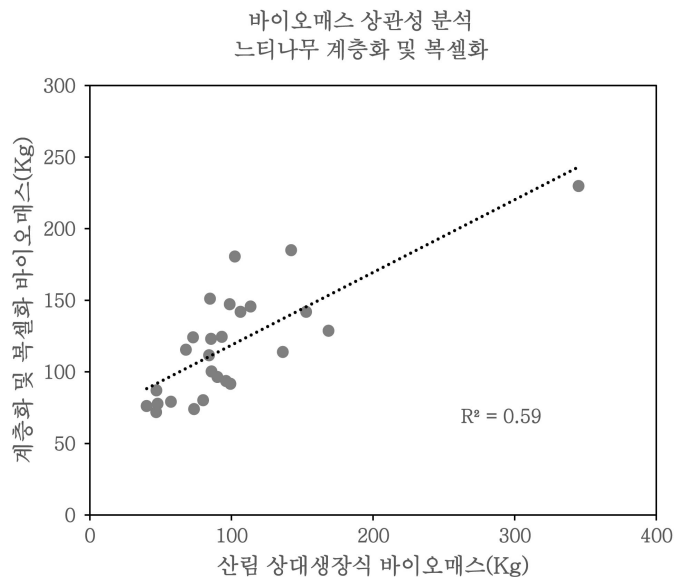
[그림 4-27] 상대생장식과 복셀화 방식에 따른 바이오매스 상관성 분석결과(벗나무 경우)



[그림 4-28] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에 따른 상관성 분석결과(벗나무 경우)



[그림 4-29] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에
따른 바이오매스 상관성분석 결과(느티나무 경우)



[그림 4-30] 상대생장식과 계층화 및 복셀화 방식에
따른 바이오매스 상관성분석 결과(느티나무 경우)

산림 바이오매스 산정식으로 산정된 바이오매스량 비하여 지상 LiDAR 기반 산정된 느티나무 바이오매스량의 상대적 증감률이 39.10%, -4.91%, 43.30%, -15.06%였고 벚나무 바이오매스량의 상대적 증감률이 47.07%, -18.58%, 47.41%, -14.94%였다.

상관성 분석 결과 봤을 때에 벚나무 R2값이 각 0.91, 0.85 느티나무의 R2값이 각 0.86, 0.59였다[그림 4-27,28,29,30].

단일 수목 중 수간부는 대량의 바이오매스를 차지하고 있어 수간부를 계층화 했을 때 실제 수목의 형태에 뚜렷한 반응(상관성이 높은 반응)이 나타난 것으로 설명할 수 있다.

제2절 수목의 흉고직경 및 수고 산정

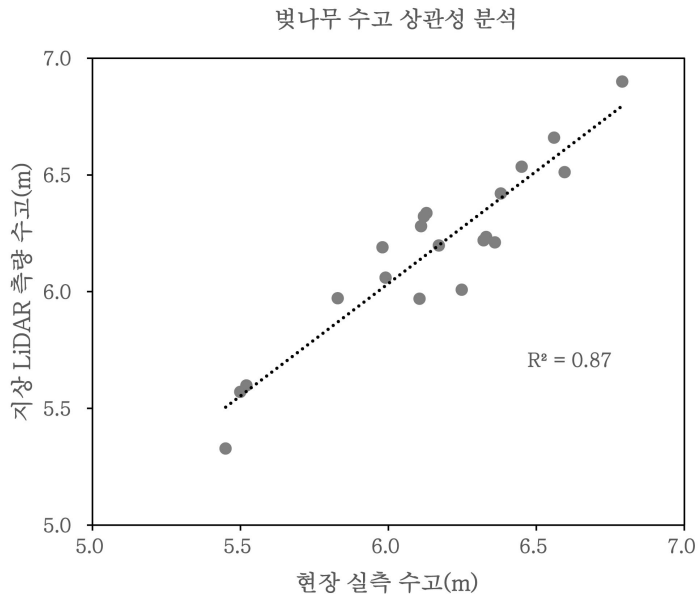
<표 4-8,9>는 수종별(느티나무, 벚나무)로 흉고직경 테이프 및 수고 측정기로 현장에서 실측한 수목 매개변수 그리고 지상 LiDAR를 이용하여 추출된 수목 매개변수의 결과이다.

<표 4-8> 느티나무 수고 및 흉고직경 측량 결과

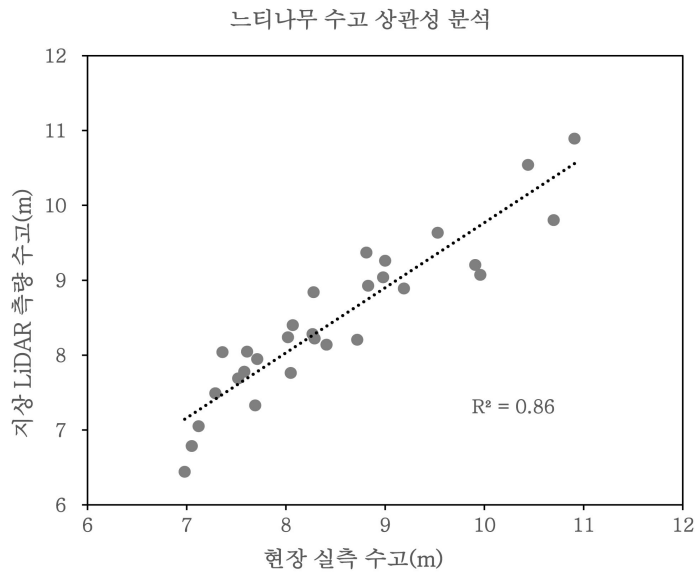
수목 번호	현장실측 흉고 직경(cm)	지상 LiDAR 측 정 흉고직 경(cm)	현장실측 수고(m)	지상 LiDAR측정 수고(m)
1.	23.80	21.42	8.84	8.28
2.	23.34	22.43	7.76	8.05
3.	18.06	17.85	8.22	8.29
4.	26.69	24.62	7.49	7.29
5.	18.42	18.15	6.44	6.98
6.	15.58	16.08	7.05	7.12
7.	24.30	27.10	8.04	7.36
8.	25.84	22.34	7.78	7.58
9.	25.45	25.50	7.33	7.69
10.	20.96	22.01	6.79	7.05
11.	21.38	23.02	7.95	7.71
12.	21.72	22.02	9.37	8.81
13.	26.18	24.38	8.89	9.19
14.	25.00	25.06	9.07	9.96
15.	25.30	23.60	9.20	9.91
16.	20.49	19.65	8.93	8.83
17.	19.52	18.02	8.28	8.27
18.	22.21	22.10	7.69	7.52
19.	18.81	18.80	9.63	9.53
20.	25.82	24.45	8.14	8.41
21.	29.18	29.60	8.05	7.61
22.	23.74	24.00	9.26	9.00
23.	21.42	25.00	10.89	10.91
24.	31.26	30.00	9.04	8.98
25.	30.78	29.81	8.21	8.72
26.	29.25	29.40	10.54	10.44
27.	27.26	26.45	9.80	10.70
28.	23.86	23.61	8.24	2.02

<표 4-9> 벚나무 수고 및 흉고직경 측량 결과

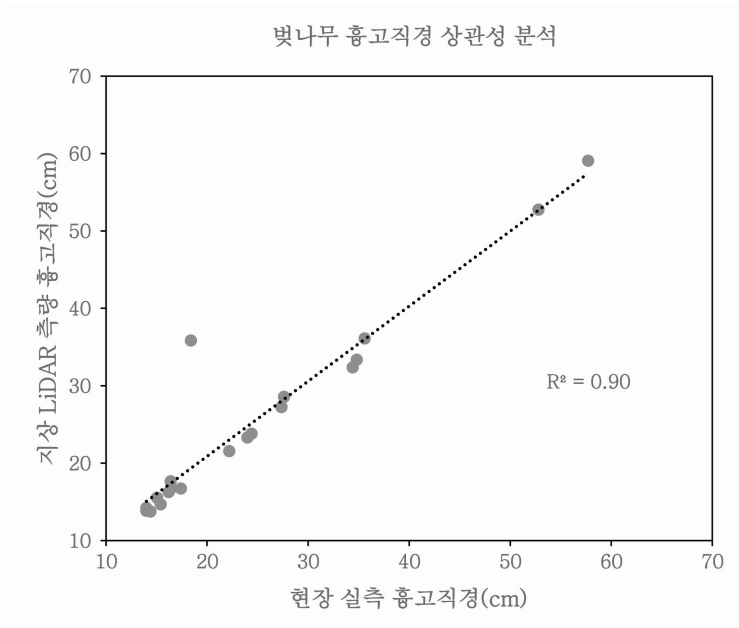
수목 번호	현장실측 흉고 직경(cm)	지상 LiDAR 측정 흉고직 경(cm)	현장실측 수고(m)	지상 LiDAR측정 수고(m)
1.	21.56	22.21	5.60	5.52
2.	16.26	16.20	6.54	6.45
3.	13.74	14.42	6.66	6.56
4.	14.22	14.40	6.19	5.98
5.	13.84	14.40	6.28	6.11
6.	13.84	15.41	6.20	6.17
7.	14.68	16.42	5.33	5.45
8.	17.66	16.45	6.23	6.33
9.	16.74	17.43	6.06	5.99
10.	15.54	15.04	6.42	6.38
11.	23.80	24.41	6.51	6.60
12.	35.86	18.45	5.97	6.10
13.	28.56	27.62	6.01	6.25
14.	27.24	27.36	6.22	6.36
15.	36.12	35.60	6.21	6.13
16.	23.30	24.00	6.34	6.12
17.	33.38	34.85	6.32	5.50
18.	32.36	34.40	5.57	5.83
19.	59.08	57.79	5.97	6.79
20.	52.76	52.82	6.90	6.33



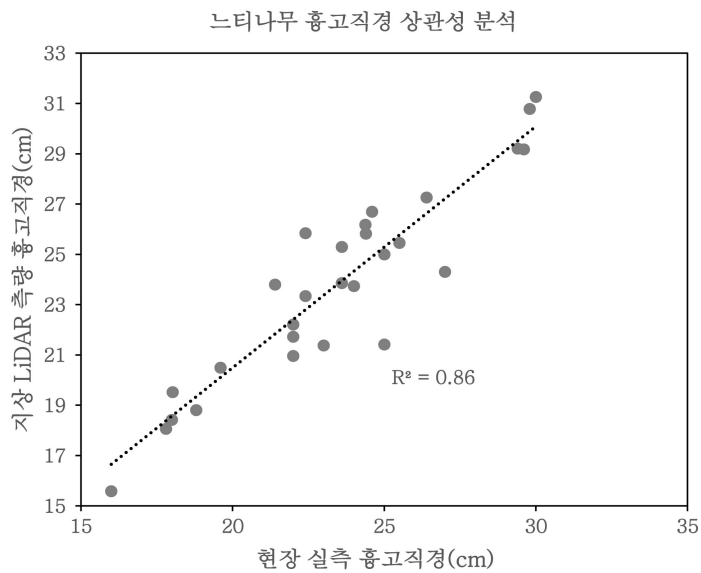
[그림 4-31] 현장실측과 지상 LiDAR 측량에 따른 수고 상관성 분석 결과(벗나무 경우)



[그림 4-32] 현장실측과 지상 LiDAR 측량에 따른 수고 상관성 분석 결과(느티나무 경우)



[그림 4-33] 현장실측과 지상 LiDAR 측량에 따른
흉고직경 상관성 분석 결과(벚나무 경우)



[그림 4-34] 현장실측과 지상LiDAR측량에 따른
흉고직경 상관성 분석 결과(느티나무 경우)

지상 LiDAR 기반 측정된 느티나무, 벚나무의 흉고직경과 수고 결과가 비교적 좋은 추출 결과 나타나게 되었으며 흉고직경 RMSE 값이 각 2.11cm, 3.99cm, 수고의 RMSE 값이 각 0.61m, 0.36m였다.

수목의 매개변수 검증 결과 그래프를 보면 일부 값은 큰 오차를 가지게 되었다. 이는 도시에 성장하는 수목의 일부 지름이 1.3m의 흉고부위에서 분기가 생기기 때문에 이 알고리즘을 사용한 추출 결과에 영향을 미치지만 대다수의 피팅(Fitting) 결과는 좋은 결과 얻었다는 것을 보일 수 있다.

추출 결과로 봤을 때 정확도가 높게 나타났다. 대다수 경우에는 수목이 원통형으로 가정되어 있어 일반적으로 결과 값이 향상되어 나타난다. 피팅 결과를 더 정확하게 얻기 위해서는 수목의 형태를 고려하여 추출하는 것이 필요하다. 그러나 본 연구에서 측정된 수목은 단 몇 개의 비정상적인 형태를 제외하고는 원통형 형태를 지니고 있었으므로 실제 본 연구에서 사용된 알고리즘이 빠른 속도로 흉고직경 피팅 결과를 추출할 수 있었다.

총체로 봤을 때 지상 LiDAR로 획득된 수간 부위의 흉고직경과 수고는 현장에서 실측된 결과와 비교하였을 때 정확도가 높게 추출하게 되는 것을 추출되는 것을 확인할 수 있었다.

제5장 결론

본 연구에서 기존 연구자들이 연구된 기초 상에, 지상 LiDAR의 쟁점을 이용하여 수목의 부위별 재적을 산정하였다. FARO Focus s350 지상 레이저 스캐너를 통하여 28그루의 느티나무 20그루의 벚나무를 대상으로 선정하여 수목의 재적을 산정하기 위해 필요한 수목의 구조 변수에 대해서 측정 및 추출하게 되었다. 우선 스캔 된 점군데이터에 대해서 전처리를 진행하였는데 전처리 과정은 총 두 개의 큰 부분으로 구성 되어 있다. 하나는 좌표 보정단계이고 다른 하나는 노이즈 제거 단계였다. 좌표 보정은 스캔 된 수목의 점군데이터를 완전하게 표현하기 위하여 하는 것이고, 노이즈 제거는 인위 자연 등 요소 혹은 기계 자체 생성된 수목 점군데이터에 대하여 영향 줄 수 있는 데이터를 노이즈 감소 혹은 제거하기 위하여 하는 것이다.

그리고 수목 구조의 매개변수 수고 및 흉고직경을 추출하였다. 수고 부분은 획득된 점군데이터를 통하여 직접 얻을 수 있고 수목의 흉고직경은 Hough Transform 그리고 Circle fitting의 결합한 알고리즘으로, Matlab에서 코딩하여 점군데이터의 실제 데이터를 통해 계산하게 되었다.

수목의 수간 부분의 재적 및 가지 부의 재적 그리고 잎의 체적을 계산하기 위하여 산림경영 측량 분야에서 일반적으로 사용되는 Smalian 공식 그리고 계층화 처리 방법, 복셀화 방법으로 진행하였다. 이상의 방법들은 각자의 쟁점을 가지고 있다.

서로 다른 수종, 수목의 형태, 다양한 산정방식의 따라서 산정된 수간 부의 재적 가지 부의 재적 그리고 잎 부분의 부피에 대해서 연구 고찰을 진행하게 되었다. 수종별 차이 그리고 수목의 구조 형태가 달라서 일정한 차이가 있는 것으로 나타났다.

복셀화 방법을 적용하였을 때에 Voxel내부의 공간이 채워지지 않았기 때문에 추출된 수간 부 가지 부의 Voxel후의 내부공간이 비게되었다. 내부공간을 채우기 위해 복셀을 가능한 큰 크기로 설정하는 것을 통하여

채우는 식으로 수간 부의 재적을 산정하였다.

연구의 한계점 가운데 하나는 점군데이터가 부분적으로 누락되어 완전한 형태로 재현하기 어렵게 된 점이다. 이로 인해 추출된 결과의 정확도가 높지 않게 되었다. 점군데이터를 복셀화해 수목의 실제 현상을 보다 현실 형상화 직관적으로 시각화 할 수 있으며, 수간 점군 데이터를 계층화하는 것을 통하여 수목의 수간부의 형태를 더 세부적으로 구분 할 수 있다. 수종별 그리고 흉고직경의 분포의 달라서 다양한 산정 방법을 적용하여 추출된 재적의 결과 차이도 다르게 나타나게 되었다. 기존에 산림 분야에서 사용했던 축적식은 도시내부에 사용했을 때 지상 LiDAR 기반에 의하여 수종별 그리고 도시 환경요인에 따라서 차이가 있는 것을 나타낸다.

적절한 Voxel 크기를 설정한 후에, 느티나무와 벚나무의 수간 부의 점군데이터를 Voxel화한 후에 직관적인 방식으로 원래 수목의 형태를 반영할 수 있으며 계산을 통하여 더욱 실제화로 수간 부의 재적을 얻을 수 있다. 이와 동시에 도시 내부에 있는 느티나무와 벚나무의 수간의 원래의 형태도 결과에 대해 일정한 영향을 미치고 있음이 나타났다.

도시 내부의 수목을 연구대상으로 진행하였기에 본 연구에서는 수목에 대하여 파괴적인 벌채를 하지 않았다. 오히려 산림 측량분야에서 사용했던 Smalian 식으로 산정된 결과 값을 참조데이터로 하여 비교연구를 진행하게 되었다.

느티나무의 수간 부위를 복셀화로 산정된 재적이 스말리안식으로 산정된 재적에 비했을 때 25.79% 증가하고, 16.03% 낮게 나타났으며 계층화로 산정하는데 17.36% 증가하고, 25.17% 낮았다. 벚나무의 수간 부위를 복셀화로 산정된 재적은 42.14% 증가하고, 26.24% 낮았다. 벚나무의 가지 부위를 복셀화로 산정된 재적이 스말리안식으로 산정된 재적에 비했을 때 66.40% 증가하고, -43.44% 낮게 나타나게 되었고 느티나무의 가지 부위를 복셀화로 산정하는데 24.98%증가하고, -20.89% 낮아졌다. 입목재적의 연구결과 봤을 때 지상 LiDAR데이터를 통해 산정방법의 차이에 따라 추정된 입목재적이 수종별로 차이를 보이고, 실제 수목의 구

조가 다른 것으로 보아 일정한 차이 및 관계가 있는 것으로 나타났다.

산림 바이오매스 산정식으로 산정된 바이오매스량 비하여 지상 LiDAR 기반 산정된 느티나무 바이오매스량의 상대적 증감률이 39.10%, -4.91%, 43.30%, -15.06%였고 벚나무 바이오매스량의 상대적 증감률이 47.07%, -18.58%, 47.41%, -14.94%였다. 단일 수목 중 수간부는 대량의 바이오매스를 차지하고 있어 수간부를 계층화 했을 때 실제 수목의 형태에 뚜렷한 반응(상관성이 높은 반응)이 나타난 것으로 설명할 수 있다.

기존의 지상 LiDAR데이터를 기반으로 한 연구의 대부분은 산림분야의 특정 수목에 대한 연구가 대부분이었다. 수종별 형태별 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이었다.

본 연구는 도시 내부에 일상적으로 식재되어 있는 조경 가로수를 연구 대상으로 하여 향후 도시지역에 있는 수목 또한 3차원 녹색 Volume의 고찰대상이 될 수 있음을 시사하고 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 박은진, 강규이. (2010). Estimation of C Storage and Annual CO₂ Uptake by Street Trees in Gyeonggi-do 한국 주요 수종별 탄소 배출계수 및 바이오메스 상대생장식. 연구 보고서. 한국환경생태학회지.
- [2] 김은영, 위광재, 조홍묵, 양인태. 2010. 항공레이저측량을 이용한 산림조사 방법에 관한 연구. 한국측량학회지 (한국측량학회), 28(3) : 299-304
- [3] 조두영, 김의명. 2012. 모의 항공 라이다 자료를 이용한 개별 가로수의 추정. 한국측량학회지 (한국측량학회), 30(3) : 269-277
- [4] 이수지, 박진이, 김의명. 2014. 항공 라이다 자료를 이용한 수목추출의 자동화 모델개발. 한국산학기술학회논문지 (한국산학기술학회), 15(5) : 3213-3219
- [5] 황세란, 이임평. 2011. 산림지형 모델링을 위한 항공 라이다 데이터의 지면점 필터링 비교분석과 정확도 개선. 한국측량학회지 (한국측량학회), 29(6) : 641-650
- [6] 전민철, 정태웅, 어양담, 김진광. 2010. 계절별 항공라이다 자료에 의한 수고 추정. 한국측량학회지 (한국측량학회), 28(4) : 441-448
- [7] 이상진, 최윤수, 윤하수. 2012. 항공 LiDAR 데이터를 이용한 산림의 이산화탄소 고정량 추정. 한국측량학회지 (한국측량학회), 30(3) : 259-268

- [8] 김의명. 2013. 라이다 자료와 정사영상을 이용한 산림지역의 수목영역추출. 지형공간정보 (한국지형공간정보학회), 21(2) : 27-34
- [9] 조두영, 김의명. 2010. 라이다 자료를 이용한 도시지역의 수목공간정보 추출. 지형공간정보 (한국지형공간정보학회), 18(4) : 11-20
- [10] 이수지, 김의명. 2013. 라이다 자료를 이용한 수목추출 자동화. 지형공간정보 (한국지형공간정보학회), 21(1) : 39-44
- [11] 황세란 (Se Ran Hwang), 이미진 (Mi Jin Lee), 이임평 (Im Pyeong Lee).2012. 공간정보 구축 및 응용 : 항공 라이다데이터를 이용한 개별수목탐지 및 평균수고추정. 한국공간정보학회지, 20(3) : 27-38
- [12] 장안진 (An Jin Chang), 김형태 (Hyung Tae Kim). 2008. 항공사진과 Lidar 데이터를 이용한 산림지역의 바이오매스 추정에 관한 연구. 한국지리정보학회지, 11(3) :166-173
- [13] 손영모 (Yeong Mo Son), 김경남 (Kyeong Nam Kim), 표정기 (Jung Kee Pyo). 2016. 서울시 가로수의 재적식 개발 및 탄소저장량 평가. 농업생명과학연구, 50(1) :95-104
- [14] 조현길 (Hyun Kil Jo), 김진영 (Jin Young Kim), 박혜미 (Hye Mi Park).2013. 도시 상록 조경수의 탄소저장 및 흡수 -소나무와 잣나무를 대상으로-. 한국환경생태학회지, 27(5) : 571-578
- [15] 송철철 , "항공 및 地上라이다에 의한 林分構造의 逆工學的 3次元 復原" ,2007. ,고려대학교 대학원 박사학위 논문.

- [16] Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyyppä J.,... Alho, P. (2013). Individual tree biomass estimation using terrestrial laserscanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75, 64–75.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003>
- [17] Yao, T., Yang, X., Zhao, F., Wang, Z., Zhang, Q., Jupp, D., ... Strahler, A.(2011). Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echidna ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2965–2974. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.019>
- [18] Vonderach, C., Vötle, T., Adler, P., & Norra, S. (2012). Terrestrial laser scanning for estimating urban tree volume and carbon content. *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6652–6667. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.692888>
- [19] Henning, J. G., & Radtke, P. J. (2006). Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, 52(1), 67–80.
- [20] Hauglin, M., Astrup, R., Gobakken, T., & Næset, E. (2013). Estimating single-tree branch biomass of Norway spruce with terrestrial laser scanning using voxel-based and crown dimension features. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28(5), 456–469. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.777772>
- [21] Moskal, L. M., Zheng, G., Yu, X., Liang, X., Hyyppä J., Kankare, V., ... Kaasalainen, M. (2015). Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 6(1), 491–520. <https://doi.org/10.3390/f6114245>
- [22] Maas, H. G., Bienert, A., Scheller, S., & Keane, E. (2008). Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5),

1579–1593.

<https://doi.org/10.1080/01431160701736406>

- [23] Tansey, K., Selmes, N., Anstee, A., Tate, N. J., & Denniss, A. (2009). Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19), 5195–5209. <https://doi.org/10.1080/01431160902882587>
- [24] Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., ... Lewis, P. (2013). Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5(2), 491–520. <https://doi.org/10.3390/rs5020491>
- [25] Jung, S.-E., Kwak, D.-A., Park, T., Lee, W.-K., & Yoo, S. (2011). Estimating Crown Variables of Individual Trees Using Airborne and Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing*, 3(12), 2346–2363. <https://doi.org/10.3390/rs312346>
- [26] Liang, X., & Hyypä J. (2013). Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors (Switzerland)*, 13(2), 1614–1634. <https://doi.org/10.3390/s130201614>
- [27] Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J., & Holopainen, M. (2014). Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3), 1739–1748. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2253783>
- [28] Kankare, V., Puttonen, E., Holopainen, M., & Hyypä J. (2016). The effect of TLS point cloud sampling on tree detection and diameter measurement accuracy. *Remote Sensing Letters*, 7(5), 495–502. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1157639>
- [29] Maan, G. S., Singh, C. K., Singh, M. K., & Nagarajan, B. (2014). Tree

species biomass and carbon stock measurement using ground based-LiDAR. Geocarto International, 6049(July), 1-18.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2014.925003>

- [30] Kankare, V., Vauhkonen, J., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., Vastaranta, M., Joensuu, M., ... Viitala, R. (2014). Accuracy in estimation of timber assortments and stem distribution - A comparison of airborne and terrestrial laser scanning techniques. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 97, 89-97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.008>

- [31] Hosoi, F., Nakai, Y., & Omasa, K. (2013). 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82, 41-48.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.011>

- [32] Pretzsch, H., et al. (2017). "Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide." Scientificreports7(1): 15403.

- [33] Popescu, S. C. (2007). "Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar." BiomassandBioenergy31(9): 646-655.

- [34] Olschofsky, K., et al. (2016). "Operational assessment of aboveground tree volume and biomass by terrestrial laser scanning." ComputersandElectronicsinAgriculture127: 699-707

- [35] Liang, X., et al. (2016). "Terrestrial laser scanning in forest inventories." IsprsJournalofPhotogrammetryandRemoteSensing115: 63-77

